

УДК 621.384.3:[621.31:620.179]

Особенности реализации метода количественной термографической диагностики при внедрении цифровых технологий

А. Б. Власов*, К. Б. Аллояров

*Мурманский государственный технический университет, г. Мурманск, Россия;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5201-7654>, e-mail: vlasovab@mstu.edu.ru

Информация о статье Реферат

Поступила в редакцию
11.11.2019;
получена
после доработки
25.11.2019

Ключевые слова:

метод количественной термографической диагностики, диагностические параметры, испытания, тепловой нагрев, программа приведения результатов к единому критерию

Развитие методов неразрушающего контроля энергетического оборудования, в том числе методов тепловизионной диагностики, является актуальным с учетом поставленных задач реализации концепции "Цифровая трансформация 2030". В работе содержится обзор и теоретический анализ проблем, возникающих при проведении количественной термографической диагностики электрического оборудования. На примере анализа результатов тепловизионных испытаний нагрева контактного соединения при протекании электрического тока рассмотрены достоинства метода и недостатки существующих подходов. Показано, что при существующих рекомендациях обработки тепловизионных испытаний, в частности "РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования", прогнозирование и экспертная оценка теплового состояния приводят к значительным погрешностям. Произведена оценка данных многочисленных диагностических параметров, учитываемых в процессе тепловизионной диагностики, а именно: токовой нагрузки, геометрических и теплофизических параметров объекта и окружающей среды, коэффициента излучательности, скорости ветра и других. Учет электрофизических параметров объекта, особенностей его строения позволяет производить адекватную экспертную оценку и приводить данные к единому критерию, что делает возможным сравнение результатов различных испытаний, накопление банка данных, перспективой которого является расчет показателей надежности и рекомендации по совершенствованию технической базы энергетики. Подобный подход, во главе которого находится анализ количественных данных, накапливаемых в процессе тепловизионных испытаний, и сравнительный анализ данных других методов диагностики, позволит реализовать и расширить возможности метода при внедрении цифровых технологий.

Для цитирования

Власов А. Б. и др. Особенности реализации метода количественной термографической диагностики при внедрении цифровых технологий. Вестник МГТУ. 2019. Т. 22, № 4. С. 484–495. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-4-484-495.

Features of implementing the quantitative thermographic diagnostics method while introducing digital technology

Anatoly B. Vlasov*, Konstantin B. Alloyarov

*Murmansk State Technical University, Murmansk, Russia;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5201-7654>, e-mail: vlasovab@mstu.edu.ru

Article info

Received
11.11.2019;
received in revised
25.11.2019

Key words:

quantitative thermographic diagnostics method, diagnostic parameters, tests, thermal heating, program for bringing the results to a single criterion

Abstract

The development of non-destructive testing methods for power equipment including methods of thermal imaging diagnostics is relevant in view of the tasks set for implementing the concept of "Digital Transformation 2030". The paper provides a review and theoretical analysis of the problems that arise during the quantitative thermographic diagnostics of electrical equipment. On the example of analysis of the thermal imaging tests of heating a contact compound during electric current flow, the advantages of the method and the disadvantages of the existing approaches have been considered. It has been shown that with the existing recommendations for processing thermal imaging tests, in particular, "RD 34.45-51.300-97. Scope and norms of testing electrical equipment", forecasting and expert assessment of the thermal state lead to significant errors. The data of numerous diagnostic parameters taken into account in the process of thermal imaging diagnostics have been evaluated, namely: current load, geometric and thermophysical parameters of the object and the environment, emissivity, wind speed and others. Taking into account the electrophysical parameters of an object, the features of its structure allows for an adequate expert assessment and data reduction to a single criterion; this makes it possible to compare the results of various tests, to accumulate a data bank, the prospect of which is to calculate reliability indicators and recommendations for improving the technical base of power engineering. The similar approach headed by the analysis of quantitative data accumulated during thermal imaging tests, and a comparative analysis of the data of other diagnostic methods, will make it possible to implement and expand the capabilities of the method when developing digital technologies.

For citation

Vlasov, A. B. et al. 2019. Features of implementing the quantitative thermographic diagnostics method while introducing digital technology. *Vestnik of MSTU*, 22(4), pp. 484–495. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-4-484-495.

Введение

Концепция "Цифровая трансформация 2030"¹ разработана во исполнение Указов Президента Российской Федерации В. В. Путина от 09.05.2017 № 203 "О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы" и от 07.05.2018 № 204 "О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года", в которых определены национальные цели и стратегические задачи развития Российской Федерации на период до 2030 года, а также распоряжения Правительства Российской Федерации от 28.07.2017 № 1632р, которым утверждена программа "Цифровая экономика Российской Федерации".

В соответствии с Концепцией основной целью цифровой трансформации является изменение логики процессов и переход компаний на риск-ориентированное управление на основе внедрения цифровых технологий и анализа больших данных (Майоров, 2019).

С учетом недостаточного развития в отечественной электроэнергетике автоматизированной системы предиктивного анализа технического состояния энергообъектов электросетевого комплекса и интеллектуального управления им (АСПАУ) ставятся задачи реализации проектов по внедрению цифровых технологий, оснащению предприятий системами мониторинга первичного оборудования, разработке баз данных, предназначенных для выработки адекватных экспертных решений, прогнозирования и дальнейшего планирования.

Определенную роль в реализации данной Концепции играет разработка разнообразных методик технической диагностики, задачами которых является:

- повышение эксплуатационной надежности и снижение риска отказов первичного оборудования;
- непрерывная оценка состояния оборудования в процессе эксплуатации;
- оперативный контроль силового оборудования;
- повышение достоверности информации о дефектах;
- снижение расходов на проведение технического обслуживания и ремонтов;
- возможность предиктивного анализа технического состояния оборудования подстанций и т. п.

К перспективным методам относится тепловизионная диагностика, дающая возможность производить контроль состояния оборудования подстанций под напряжением в любое время года.

Принято разделять понятия тепловизионного контроля и количественную термографическую (тепловизионную) диагностику (Вавилов, 2009). В первом случае речь идет о визуализации теплового поля объекта и оценке распределения температуры; во втором – о проведении испытаний на основе методов, учитывающих конструкционные особенности оборудования, теплофизические характеристики объекта, окружающей среды, влияние ветра (на открытых подстанциях) и другие параметры, позволяющие решить задачи диагноза и прогноза.

По мере совершенствования метода тепловизионной диагностики, развития инструментальной базы энергетических предприятий, совершенствования тепловизионных приемников в период 1990–2002 гг. были утверждены регламентирующие документы как в Российской Федерации (например, РД 34.45-51.300-97²), так и в Украине³, Белоруссии⁴, а также документы специализированных объектов энергетики⁵. Опыт практической реализации показал противоречивость и недостаточность документальной основы и рекомендаций⁶ (Петров и др., URL: <http://teplovizor-tr.ru/article3.html>; Мухин, 2013; Буев, 2014; Хальямаа и др., 2015; Бажанов, 2005; Гобрей и др., 2007).

Несмотря на доступность современной аппаратуры и очевидную заинтересованность энергетических предприятий в реализации описываемого метода, его неоспоримую значимость, в научно-технической литературе практически отсутствуют данные о результатах тепловизионных испытаний, возможных методах прогнозирования, оценки рисков и т. п.

Методы и алгоритмы количественной термографической диагностики практически не используются при проведении испытаний в энергетических организациях, которые ограничиваются эпизодическим

¹ Концепция "Цифровая трансформация 2030". URL: https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf; 31 с.

² РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования / под общ. ред. Б. А. Алексева, Ф. Л. Когана, Л. Г. Мамиконянца. М.: НЦ ЭНАС, 2002. 256 с.

³ Нормативный документ Минтопэнерго Украины. СОУ-Н ЕЕ 20.577: 2007 Техническое диагностирование электрооборудования и контактных соединений электроустановок и воздушных линий электропередачи средствами инфракрасной техники. Украина.

⁴ Стандарт ГПО "Белэнерго". СТП 09110.20.366-08 "Нормы и объем испытаний электрооборудования Белорусской энергосистемы", 2009.

⁵ РД 13-04-2006. Методические рекомендации о порядке проведения теплового контроля технических средств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. М., 2007.

⁶ Организация тепловизионной диагностики электрооборудования. URL: <https://leg.co.ua/instrukcii/podstancii/organizaciya-teplovizionnoy-dagnostiki-elektrooborudovaniya.html>.

тепловизионным контролем без накопления многолетней базы данных, в отсутствие которой невозможны прогнозирование технического состояния и статистическая обработка.

Цель статьи – сравнение результатов модельного нагрева дефектов с расчетными данными по методике, рекомендованной в РД 34.45-51.300-97, а также по специализированной программе приведения результатов тепловизионного контроля к единому критерию (*Прямая задача...*, 2009; *Обратная задача...*, 2009).

Материалы и методы

В работе использованы данные тепловизионных испытаний, полученных в различные годы на объектах энергосистемы "Колэнерго".

Для анализа перспектив развития метода количественной термографии использованы результаты расчетов, алгоритм которых представлен в литературе (Власов, 2006а; 2006б).

Исследования проводились с помощью тепловизоров типа FLUKE, TESTO; принципиального отличия при использовании данных тепловизионных систем на результаты испытаний не обнаружено.

В качестве объекта испытаний выступало болтовое соединение (М5), соединяющее стальные проводники (диаметром 1,6 мм). В процессе пропускания тока (частота 50 Гц) контролировался нагрев как в области дефекта, так и на участках провода, удаленных от дефекта (рис. 1).

Величина тока провода во время испытаний изменялась в пределах от 0 до 15–18 А (100 %); по мере изменения тока провода оценка температуры с помощью тепловизионной камеры в области дефекта проводилась через 10–15 мин для установления теплового равновесия.

Для минимизации влияния различных факторов на результаты расчета проводились дополнительные испытания, например, для уточнения значения температурного коэффициента электрического сопротивления. Исследуемый объект покрывался углеродным покрытием для минимизации влияния коэффициента излучательности ε ; при расчете принято значение $\varepsilon = 0,99$. Температура окружающей среды находилась в пределах $t_0 = 21–23$ °С.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим некоторые противоречия и недостатки, заложенные в документах, регламентирующих проведение тепловизионной диагностики и обработку результатов испытаний.

В 70–80 гг. прошлого века специалистами фирмы AGEMA рекомендовано упрощенное соотношение для оценки данных при тепловизионных испытаниях, полученных при различных токах нагрузки,

$$\Delta t_{\text{расч}}/\Delta t_{\text{н}} = (I_{\text{расч}}/I_{\text{н}})^2, \quad (1)$$

где $\Delta t_{\text{расч}}$ – прогнозируемое превышение температуры поверхности объекта при повышенном, например номинальном токе $I_{\text{н}}$; $\Delta t_{\text{н}}$ – наблюдаемое (измеряемое) превышение температуры поверхности объекта при токе $I_{\text{н}}$ испытания.

Заметим, что в различной литературе под понятием "превышение температуры" понимается:

– превышение температуры t_x дефекта над температурой среды t_0 :

$$\Delta t_x = t_x - t_0; \quad (2)$$

– превышение температуры t_x дефекта над температурой $t_{\text{ф}}$ ненарушенной фазы:

$$\Delta t_x = t_x - t_{\text{ф}}. \quad (3)$$

В отечественной практике тепловизионных испытаний соотношение (1) традиционно используется при расчете температурных режимов электрического оборудования; в РД 34.45-51.300-97 формула (1) принята за основное соотношение при перерасчете данных тепловизионного контроля на различные значения тока или мощности.

Прогнозирование на основе соотношения (1) основано на следующих предположениях.

Ток $I_{\text{ф}}$, проходящий через проводник, разогревает его, и потери мощности равны

$$P_{\text{ф}} = I_{\text{ф}}^2 R. \quad (4)$$

Проводник охлаждается за счет теплопередачи, так что тепловые потери Q связаны с разностью температуры поверхности $t_{\text{пов}}$ и температуры окружающей среды $t_{\text{а}}$, т. е.

$$Q_{\text{о}} = \alpha S (t_{\text{пов}} - t_{\text{а}}) = \alpha S \Delta t_0, \quad (5)$$

где α – коэффициент, связанный с процессами теплопередачи; S – площадь поверхности.

В стационарном условии (проводник не саморазогревается) очевидно равенство

$$P_{\text{ф}} = I_{\text{ф}}^2 \cdot R = Q_{\text{о}} = \alpha S \Delta t_0. \quad (6)$$

Аналогично можно записать и для условия с током полной номинальной нагрузки $I_{\text{н}}$:

$$P_{\text{н}} = I_{\text{н}}^2 R = Q_{\text{н}} = \alpha S \Delta t_{\text{н}}. \quad (7)$$

Из соотношений (6) и (7) очевидно получается условие (1):

$$P_{\text{н}}/P_{\text{ф}} = I_{\text{н}}^2/I_{\text{ф}}^2 = \Delta t_{\text{н}}/\Delta t_0. \quad (8)$$

В то же время использование выражений (1) или (8) является возможным только при очень малых различиях между токами $I_{\text{н}}$ и $I_{\text{ф}}$, когда мало меняются многочисленные факторы, не учитываемые в упрощенной модели.

В настоящее время эмпирическое экспертное решение принимается на основе норм, приводимых в соответствующих руководящих документах, включая условия, гарантирующие температурный режим работы того или иного узла конструкции.

Опыт эксплуатации тепловизионной техники при низких нагрузках (2...20 % по току) и прогнозирования работы оборудования показывает, что на основе этих рекомендаций получаются заведомо неправильные (сильно завышенные) значения температурных перегревов; именно поэтому в РД 34.45-51.300-97 не рекомендованы тепловизионные испытания при низких нагрузках и регламентирован перерасчет по соотношению (1) либо 50 % или на 100 % нагрузки в зависимости от условий испытаний.

Подобный подход делает затруднительным прогнозирование работы оборудования и невозможным сравнение данных, полученных в различные временные интервалы и температурных режимах эксплуатации.

Для доказательства данного утверждения рассмотрим результаты исследования теплового нагрева болтового соединения М8 (условный дефект), соединяющий стальные провода диаметром 1,6 мм (рис. 1).

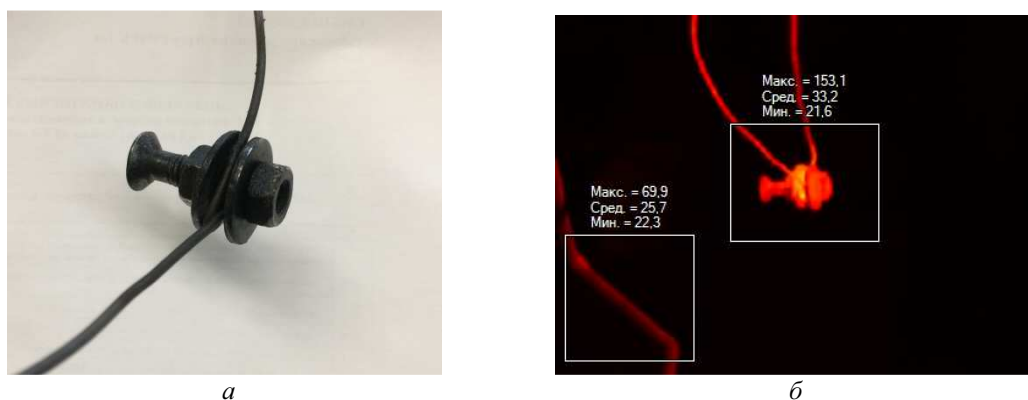


Рис. 1. Внешний вид болтового соединения (М8) (а) и его термограмма (б) при нагреве током (9 А) (тепловизор FLUKE)

Fig. 1. Appearance of the bolted connection (M8) (a) and its thermogram (b) when heated by current (9A) (FLUKE thermal imager)

На рис. 1 приведены фотография, термограммы, полученные в процессе испытаний, на основе которых оценивались значения максимальной $t_{\text{max}}(I)$ температуры в зависимости от протекающего тока.

Данные нагрева участков ненарушенного провода (кривые 1–3), находящихся на расстоянии более 0,5 м от болтового соединения, а также значения максимальной температуры t_{max} в области болтового соединения (кривые 4–6) приведены на рис. 2; испытания проводились при различной степени обжатия болтового соединения.

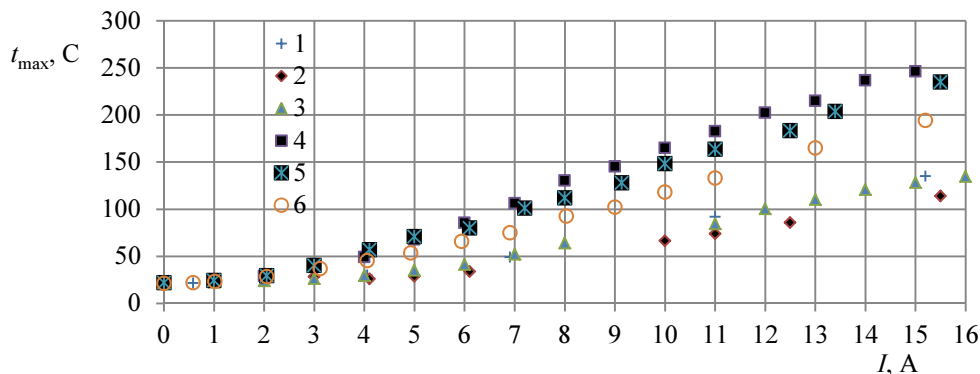


Рис. 2. Зависимости значений t_{max} от тока провода:

1, 2, 3 – ненарушенный провод; 3, 4, 5 – область болтового соединения

Fig. 2. Dependences of t_{max} on the wire current:

1, 2, 3 – the undisturbed wire; 3, 4, 5 – the area of bolted connection

Видно, что при различной степени дефектности контакта (разная степень обжатия) зависимость максимальной температуры ненарушенного провода от тока в диапазоне 0–16 А в целом идентична: температура достигает значений 135–140 °С при максимальном токе.

Различное обжатие контакта влияет на максимальную температуру дефекта, которая лежит в пределах от 190 до 250 °С (при токе 15 А).

В наибольшей степени происходит нагрев непосредственно в области болтового соединения (рис. 2, кривая 4) – температура достигает 250 °С (при токе $I = 15$ А); при этом максимальная температура на удалении более 0,5 м – не выше 130 °С.

Проведем анализ зависимости максимальной температуры $t_{\max}(I)$, зафиксированной при испытании, описываемой кривой 6 на рис. 2.

По мере увеличения тока от 0 до 17,7 А (100 % токовой нагрузки) максимальная температура возрастает вплоть до 225 °С (рис. 3, а: кривая 1; рис. 3, б: кривая 1). При токовой нагрузке 50 % температура дефекта не более 80 °С; при 100 % – температура дефекта не превышает 230 °С.

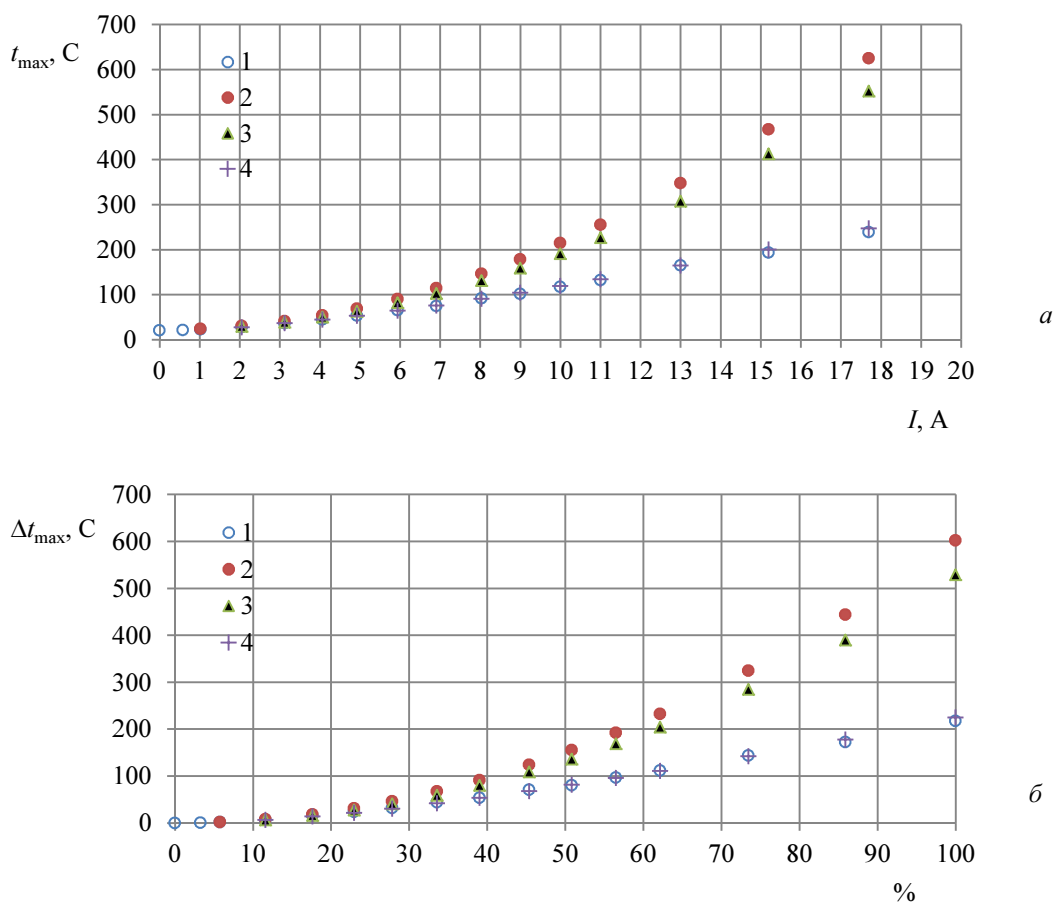


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры (а) и превышения температуры (б) от тока и процента тока от максимального значения: 1 – максимальная температура дефекта при испытании; 2 – перерасчет температуры от 6 % по (1); 3 – перерасчет температуры от 11,6 %, 4 – перерасчет по программе приведения

Fig. 3. The dependence of the maximum temperature (а) and excess temperature (б) on the current and the percentage of current on the maximum value: 1 – the maximum temperature of the defect during the test; 2 – the recalculation of temperature from 6 % according to (1); 3 – the recalculation of temperature from 11.6 %, 4 – the recalculation according to the reduction program

Аналогично на рис. 3 представлены расчетные значения максимальной температуры дефекта (кривые 2 и 3), полученные при использовании соотношения (1) при перерасчете экспериментальных значений от 6 % и 11,6 % токовой нагрузки соответственно.

Например, принимая за основу значение тока 2,05 А (11,6 % токовой нагрузки), получаем, что максимальная температура дефекта равна $t_{6\%} = 30,1$ °С; исходная температура – $t_0 = 23$ °С. С учетом соотношения (1) производим перерасчет и получаем (кривая 3): при 50 % нагрузке максимальная

температура должна достигать 140 °С (в эксперименте не более 80 °С), а при 100 % нагрузке температура дефекта – 530 °С (при реально наблюдаемой температуре менее 230 °С).

Таким образом, при обработке данных тепловизионного испытания, произведенного по рекомендациям РД 34.45-51.300-97 в соответствии с формулой (1), расчетные (прогнозируемые, предиктивные) значения при пересчете на токовую нагрузку 50 ÷ 100 % заведомо завышены.

Еще более завышенные значения получаются при перерасчете экспериментальных данных, полученных при токовой нагрузке менее 10 % (рис. 3, кривые 2).

Данные эксперимента имеют непосредственное значение для тепловизионных испытаний, в частности, зачастую испытания проводятся при пониженной нагрузке (10÷15 %), в ветреную погоду, после чего возникает необходимость предсказания поведения дефектов при повышенной нагрузке, в безветрие, при возрастающей температуре среды и т. п.

Причиной расхождения экспериментальных и расчетных значений температуры является упрощенный характер соотношения (1), не учитывающий многочисленные условия и диагностические параметры испытаний, а именно: форму объекта, наличие или отсутствие ветровой нагрузки, материал проводника, коэффициент излучательности и другие (Власов, 2006а; 2006б; Прямая задача..., 2009; Обратная задача..., 2009; Vlasov et al., 2019).

При проведении испытаний с малой нагрузкой и пересчете данных на 50 % или 100 % нагрузку, расчет по рекомендуемой формуле (1) дает завышенные значения, что связано с игнорированием многих факторов, к которым можно (с разной степенью влияния) отнести:

- влияние радиационного охлаждения объекта за счет излучения и его доминирующее влияние над теплопередачей по мере увеличения температуры;
- влияние температуры на все физические параметры воздуха и, следовательно, процесс теплопередачи, которая изменяется с ростом температуры;
- влияние температуры на электрическое сопротивление объекта и, таким образом, на процесс тепловыделения;
- влияние размеров изделия на процессы конвекции (в том числе ламинарные или турбулентные потоки) около изделия, и, следовательно, на температуру объекта;
- влияние скорости ветра на потоки около изделия;
- совокупное влияние всех перечисленных и других факторов друг на друга и на температуру поверхности изделия.

Все упомянутые диагностические параметры существенно влияют на точность прогнозирования результатов тепловизионного контроля, и значит, на целесообразность того или иного действия экспертов.

Подобные завышенные данные приводят к неправильной экспертной оценке, выдаче некорректных рекомендаций, немотивированной остановке оборудования, расходованию дефицитных материалов и финансовых средств, невозможности сравнения данных, полученных в различное время испытаний.

Очевидно, что такого рода подход не может быть использован при создании единого банка данных тепловизионных испытаний, поскольку не учитывает многочисленных диагностических параметров, реальных условий испытаний, характерных особенностей испытываемых объектов и т. п.

Предусмотреть, например, уровень нагрузки, скорость ветра, температуру среды в тот или иной период испытаний невозможно ввиду эксплуатационных особенностей подстанций, поэтому для обоснованной экспертной оценки необходимо использовать алгоритмы расчета и прогнозирования безотносительно к параметрам испытаний, производя расчет по специализированным программам.

Для устранения отмеченных проблем был разработан подход к оценке данных тепловизионной диагностики, основанный на физических явлениях, учитывающий особенности тепловизионной диагностики, включая процессы теплопередачи от объекта в окружающую среду, конвекционные потоки и потоки за счет теплоотдачи излучением, теплофизические свойства воздуха, электрофизические параметры проводниковых, диэлектрических материалов и другие (Власов, 2006а; 2006б; Прямая задача..., 2009; Обратная задача..., 2009; Vlasov et al., 2019). Это позволило создать программу приведения результатов тепловизионного контроля к единому критерию, в частности, для расчета нагрева элементов при номинальной нагрузке при приведенной температуре окружающей среды 40 °С или произвольного значения.

Программа принята для использования на энергетических предприятиях Украины, Беларуси, Российской Федерации (ОАО "Колэнерго").

На рис. 4 приведены диагностические параметры и результаты расчетов максимальной температуры болтового соединения (дефекта), произведенных от токовой нагрузки 11,6 %. Основными параметрами являются: токовая нагрузка, скорость ветра, тип объекта (форма), материал токоведущего провода, коэффициент излучательности (рис. 4).

Для рассматриваемого примера получаем: при перерасчете температуры дефекта, полученной при токе 2,05 А на значение тока 17,7 А (100 %), имеет $t_{\max \text{ расч}} = 248,4$ °С (при реальном значении $t_{\max \text{ эксп}} = 239$ °С).

Проведенные опыты и расчеты показывают, что для эффективного применения метода тепловизионной диагностики, накопления и использования базы данных необходимо дальнейшее развитие методик с внедрением алгоритмов количественной термографической диагностики.

Следует заметить, что рекомендации РД 34.45-51.300-97 не учитывают влияние ветровой нагрузки, естественной при проведении испытаний на открытых подстанциях. Подобное влияние ветра может быть учтено только при полном учете электрофизических параметров среды, расчете тепловых потоков вблизи нагретого объекта (Власов, 2006а; 2006б; Прямая задача..., 2009; Обратная задача..., 2009; Vlasov et al., 2019).

Обработка данных произведена		11-19-2019
ПАРАМЕТРЫ ИСПЫТАНИЙ		
Температура среды при испытании		23
Ток нагрузки при испытании		2.05
Расчет производится на ток нагрузки, А		17.7
Процент нагрузки по току, %		11.6
Скорость ветра при испытании, м/с		0
ПРЕВЫШЕНИЕ температуры поверхности при испытании, оС		7.1
ТЕМПЕРАТУРА поверхности при испытании, оС		30.1
Форма объекта -	горизонтальный цилиндр	
Металл объекта -	особый	
TKR материала, 1/К	.0004	
Коэффициент излучательности		.99
Определяющий размер объекта, м		.02
РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ		
ПРЕВЫШЕНИЕ температуры дефекта по РД 34.45-51.300-97 (без учета влияния скорости ветра и других факторов)		529.3
УЧЕТ ТОКА, ТЕМПЕРАТУРЫ, СКОРОСТИ ВЕТРА, ИЗЛУЧАТЕЛЬНОСТИ, ГЕОМЕТРИИ ОБЪЕКТОВ		
Расчет производится на температуру приведения (среды)		23
Расчет производится на скорость ветра, м/с		0
Расчетное ПРЕВЫШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ поверхности		225.4
Расчетная ТЕМПЕРАТУРА ПОВЕРХНОСТИ		248.4

Рис. 4. Скриншот экрана при расчете данных тепловизионных испытаний с помощью программы приведения
Fig. 4. Screenshot of calculating thermal imaging test data using the reduction program

Предложенные алгоритмы расчета температуры имеют перспективу для количественной оценки параметров разнообразного электротехнического оборудования, в том числе трансформаторов напряжения, тока, высоковольтных вводов и других при детальном анализе их конструкции, режимов эксплуатации (Власов, 2006а).

Например, при моделировании трансформаторов тока типа ТФКН-330 (Власов, 2006а) получены следующие результаты: увеличение значений tgδ изоляции на 1 % вызывает незначительное (до 0,1 °С) возрастание значений избыточной температуры (при сравнении фаз) покрышки (рис. 5), что согласуется многократно подтверждаемыми экспериментальными данными.

Систематический анализ состояния электрооборудования в энергетической системе позволяет оценивать параметры эксплуатационной надежности электрооборудования в процессе обработки банка тепловизионных испытаний и выявить влияние различных факторов на параметры накопления дефектов.

На рис. 6 приведены обобщенные данные по потоку отказов контактных соединений, выявленных в процессе многолетних испытаний на подстанциях (110–330 кВ) Мурманской области: в наибольшей степени уровень дефектности контактных соединений проявляется на объектах класса напряжения 110–220 кВ, в меньшей – подстанции 330 кВ (выделены темным цветом).

Накопление базы банка данных энергосистемы позволяет не только оперативно оценивать качество эксплуатации конкретной подстанции по сравнению с аналогичными объектами, но и учитывать влияние производственных и климатических факторов на надежную эксплуатацию объекта.

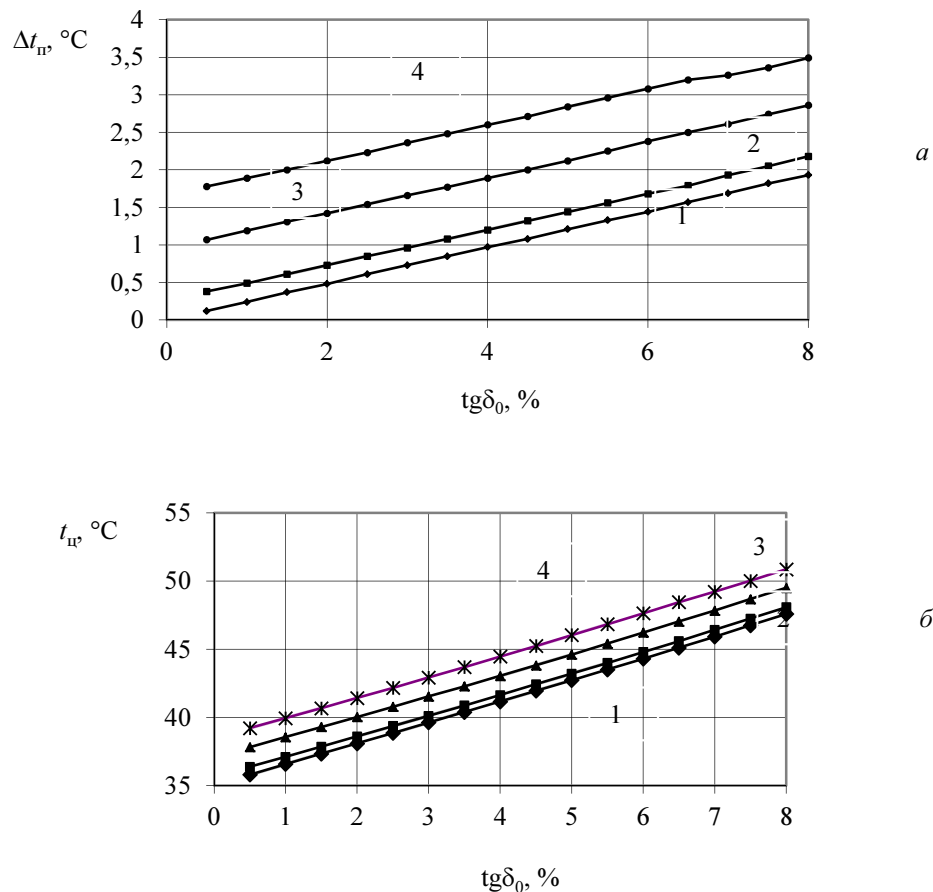


Рис. 5. Зависимости $\Delta t_n(\text{tg}\delta_0)$ (а) и $t_n(\text{tg}\delta_0)$ (б) при $t_0 = 35$ °C и токе I , равном 0 (1), 750 (2), 1500 (3), 2000 А (4)
Fig. 5. Dependences $\Delta t_n(\text{tg}\delta_0)$ (a) and $t_n(\text{tg}\delta_0)$ (b) at $t_0 = 35$ °C and the current I equal to 0 (1), 750 (2), 1,500 (3), 2,000 А (4)

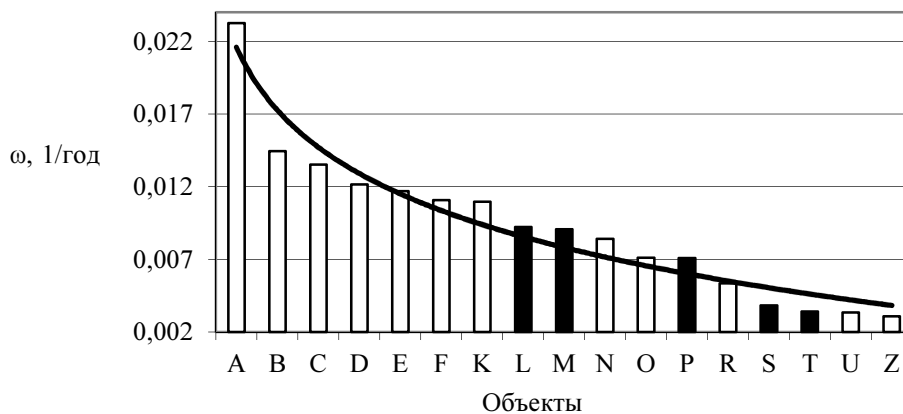


Рис. 6. Поток повреждений контактных соединений на подстанциях 110–330 кВ, обнаруживаемых с помощью тепловизионной диагностики
Fig. 6. Damage flow of contact joints at substations 110–330kV detected by thermal imaging diagnostics

На рис. 7 приведены результаты анализа взаимосвязи вероятности безотказной работы $R(t)$ для контактных соединений с интенсивностью гроз на объектах 110–150 кВ Мурманской области (интенсивность грозовых явлений оценивалась по данным метеостанций в течение ряда календарных лет).

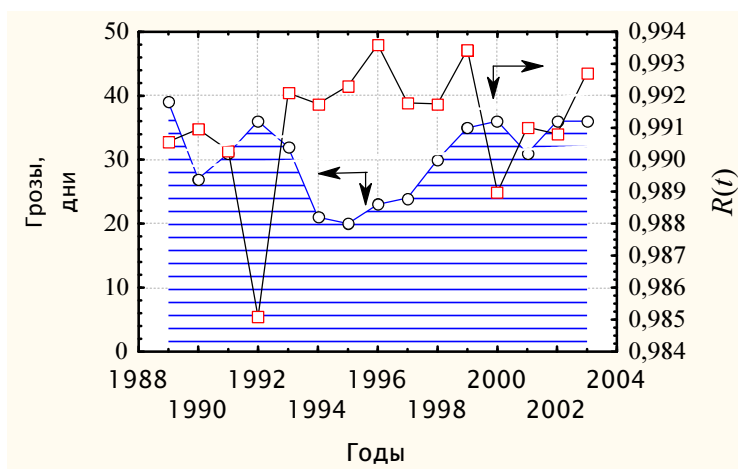


Рис. 7. Взаимосвязь вероятности безотказной работы $R(t)$ для контактных соединений с интенсивностью гроз на объектах 110–150 кВ Мурманской области

Fig. 7. Relation of the probability of uptime $R(t)$ for contact connections with the intensity of thunderstorms at 110–150 kV facilities in the Murmansk region

Видно, что в календарные 1992 и 2000 годы, характеризуемые высокими показателями грозовой активности, накопление дефектов контактных соединений происходило более интенсивно.

Внедрение тепловизионных испытаний в практику обнаружило существенный недостаток для дальнейшего распространения метода.

С одной стороны, это связано как с эпизодическим использованием дорогостоящей аппаратуры (в плановые периоды испытаний 1–2 раза в год, внеплановые после ремонта и т. п.), так и с отсутствием регулярных осмотров, недостатком специалистов.

Более значимым является недостаток, связанный с затруднением использования подобной техники для контроля элементов оборудования в распределительных устройствах типа КРУ подстанций, главных распределительных щитов (ГРЩ), например, на закрытых и автоматизированных подстанциях, оборудовании морских судов, в том числе с уровнем напряжения до 10 В.

По нашему мнению, перспективным является разработка устройств непрерывного ИК- и видеоконтроля технического состояния электрооборудования, которые характеризуются малой стоимостью по сравнению с тепловизионными приемниками, но предназначены для работы в закрытых шкафах (под напряжением). Извещатель не предназначен для проведения метрологических испытаний, но является эффективным для контроля текущего состояния наблюдаемого объекта при длительной работе под нагрузкой.

На рис. 8 представлен детектор подобного извещателя, включающего в себя модули микро-ИК и видеокамеры, позволяющие проводить непрерывное наблюдение и обработку информации.



Рис. 8. Детектор извещателя для непрерывного ИК- и видеоконтроля технического состояния электрооборудования

Fig. 8. Detector for continuous IR and video monitoring the technical condition of electrical equipment

На рис. 9 показаны термограммы исследуемого оборудования шкафов судового ГРЩ с уставкой, например, на температуру 80 °С, при которой происходит образование сигнала о достижении критической температуры того или иного элемента.

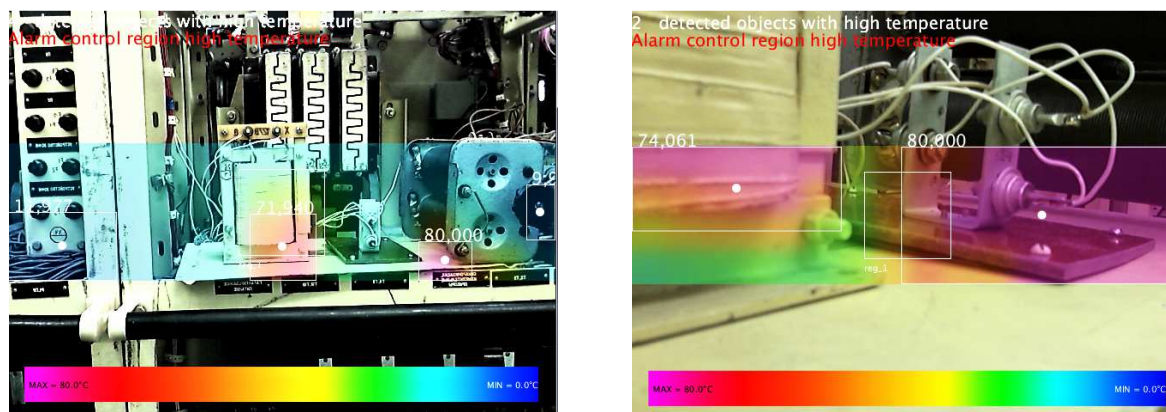


Рис. 9. Отдельные термограммы, полученные с помощью извещателя, установленного внутри закрытой ячейки (под блокировкой) электротехнического оборудования
Fig. 9. Individual thermograms obtained using the detector installed inside a closed cell (under blocking) of the electrical equipment

Задачей подобных устройств (извещателей), штатно или временно устанавливаемых в шкафу закрытой (под блокировкой) высоковольтной ячейки, является оценка текущего состояния элемента, непрерывная передача информации оператору, фиксация предела нарушения теплового состояния. Сигнал о достижении предаварийного или аварийного состояния позволит оператору принять экспертное решение о дальнейшей эксплуатации с применением дополнительных методов диагностики. Непрерывная запись данных технического состояния, передаваемых в банк, дает возможность произвести учет эксплуатационных факторов, в том числе при различных нагрузках и старении оборудования.

Выводы

Метод количественной термографической диагностики в электроэнергетике используется в недостаточной степени.

По нашему мнению, подобное состояние метода связано с отсутствием научного подхода к проблемам тепловизионной диагностики и интерпретации данных при анализе технического состояния электроэнергетического оборудования, включая высоковольтное.

С одной стороны, развитие инструментальной базы обеспечивает возможность совершенствования экспертной оценки оборудования распределительных устройств и комплектных ячеек, с другой – экспертная оценка основана на эмпирических критериях, не учитывающих многочисленные диагностические параметры.

Отсутствие базы данных энергетических предприятий, накапливаемых в процессе регулярных и внеплановых обследований, а также практики обмена данными не позволяют производить коррекцию разрабатываемых методик и их совершенствование, оценивать параметры безотказной работы оборудования, производить прогностические и предиктивные оценки.

Это свидетельствует о необходимости дальнейшего развития методик количественной тепловизионной диагностики на основе тесного взаимодействия разработчиков оборудования, энергосистем, накапливающих базы данных, совершенствования уровня подготовки специалистов.

При решении ряда задач метод количественной термографической диагностики может стать одним из незаменимых при построении системы внедрения цифровых технологий и анализа большого количества данных электроэнергетического оборудования.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № ГР АААА-А17-117041210284-1 "Разработка методов оперативной диагностики и оценки технического состояния электроэнергетического оборудования флота".

Библиографический список

- Бажанов С. А. Тепловизионный контроль электрооборудования в эксплуатации (часть 1). М. : НТФ "Энергопрогресс", 2005. 80 с.
- Бувев С. А. Совершенствование технического аудита оборудования морских судов на основе системы термографического анализа : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.19. Мурманск, 2014. 19 с.
- Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М. : Спектр, 2009. 544 с.
- Власов А. Б. Модели и методы термографической диагностики объектов энергетики. М. : Колос, 2006а. 279 с.
- Власов А. Б. Оценка влияния ветровой нагрузки на результаты тепловизионного контроля объектов энергетики // *Электротехника*. 2006б. № 12. С. 15–21.
- Гобрей Р., Чернов В., Удод Э. Диагностирование электроустановок 0,4–750 кВ средствами инфракрасной техники. Киев : КВЦ, 2007. 374 с.
- Майоров А. В. На пути в будущее // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2019. № 2 (53). С. 6–11.
- Мухин Е. А. Повышение эксплуатационной надежности электрооборудования инфраструктуры предприятий АПК на базе количественной термографии : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02. Санкт-Петербург – Пушкин, 2013. 20 с.
- Обратная задача оценки влияния ветровой нагрузки на результаты тепловизионного контроля : св-во о гос. рег. прогр. для ЭВМ 2009612118 Рос. Федерация / Власов А. Б. № 2009610927 ; дата поступл. заявки 11.03.2009; дата регистр. 24.04.2009.
- Петров Д. С., Сидельников С. С., Лездин Д. Ю. Тепловизионный контроль в энергетических обследованиях. URL: <http://teplovizor-tr.ru/article3.html>.
- Прямая задача оценки влияния ветровой нагрузки на результаты тепловизионного контроля : св-во о гос. рег. прогр. для ЭВМ 2009612117 Рос. Федерация / Власов А. Б. № 2009610926; дата поступл. 11.03.2009; дата регистр. 24.04.2009.
- Хальямаа А. И., Дмитриев С. А., Кокин С. Е., Глушков Д. А. Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций / науч. ред. А. А. Суворов. Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2015. 64 с.
- Vlasov A., Alloyarov K., Rubtsova A. Features of thermovision control of open substations equipment with wind load registration // *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, 4th International Scientific Conference "Arctic: History and Modernity", 17–18 April 2019, Saint Petersburg, Russian Federation. 2019. Vol. 302. P. 012105. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/302/1/012105>.

References

- Bazhanov, S. A. 2005. Thermal monitoring of electrical equipment in operation. (Part 1.) Moscow. (In Russ.)
- Buyev, S. A. 2014. Improving the technical audit of marine equipment based on a thermographic analysis system. Abstract of Ph.D. dissertation. Murmansk. (In Russ.)
- Vavilov, V. P. 2009. Infrared thermography and thermal control. Moscow. (In Russ.)
- Vlasov, A. B. 2006a. Models and methods of thermographic diagnostics of energy facilities. Moscow. (In Russ.)
- Vlasov, A. B. 2006b. Assessment of wind load effect on the results of thermal imaging control of energy facilities. *Elektrotehnika*, 12, pp. 15–21. (In Russ.)
- Gobrey, R., Chernov, V., Udod, E. 2007. Diagnostics of electrical installations 0.4–750kV by infrared technology. Kiev. (In Russ.)
- Mayorov, A. V. 2019. On the way to the future. *Electrical energy. Transmission and distribution*, 2(53), pp. 6–11. (In Russ.)
- Mukhin, E. A. 2013. Improving the operational reliability of electrical equipment of agribusiness industry infrastructure based on quantitative thermography. Abstract of Ph.D. dissertation. Saint Petersburg – Pushkin. (In Russ.)
- Vlasov, A. B. 2009. The inverse problem of assessing the effect of wind load on the results of thermal imaging control. St. of state reg. for computer prog. 2009612118 Rus. Federation / No. 2009610927. (In Russ.)
- Petrov, D. S., Sidelnikov, S. S., Lezdin, D. Yu. Heat monitoring in energy surveys. URL: <http://teplovizor-tr.ru/article3.html>. (In Russ.)
- Vlasov, A. B. 2009. The direct problem of assessing the effect of wind load on the results of thermal imaging control. St. of state reg. for computer prog. 2009612117 Rus. Federation / No. 2009610926. (In Russ.)
- Halyamaa, A. I., Dmitriev, S. A., Kokin, S. E., Glushkov, D. A. 2015. Diagnostics of electrical equipment of power plants and substations. Sc. ed. A. A. Suvorov. Ekaterinburg. (In Russ.)
- Vlasov, A., Alloyarov, K., Rubtsova, A. 2019. Features of thermovision control of open substations equipment with wind load registration. *Proceedings of IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, 4th International Scientific Conference "Arctic: History and Modernity", 302, pp. 012105. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/302/1/012105>.

Сведения об авторах

Власов Анатолий Борисович – ул. Спортивная, д. 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, д-р техн. наук, профессор; e-mail: vlasovab@mstu.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5201-7654>

Anatoly B. Vlasov – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Dr of Sci. (Engineering), Professor; e-mail: vlasovab@mstu.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5201-7654>

Аллояров Константин Борисович – ул. Спортивная, д. 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: alloyarovkb@mstu.edu.ru

Konstantin B. Alloyarov – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher; e-mail: alloyarovkb@mstu.edu.ru