

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(Национальный исследовательский университет)  
Политехнический институт. Энергетический факультет  
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, \_\_\_\_\_

(должность)

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/

(подпись и печать)

(И.О. Фамилия)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_/ И.М. Кирпичникова /

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

«Разработка устройства непрерывного анализа состояния электрического  
контакта»

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ НАУЧНАЯ РАБОТА  
ЮУрГУ – 13.04.02.2020.309 ПЗ ВКР

Руководитель, доцент, к.т.н

\_\_\_\_\_/ В.С.Павлюков /

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Автор работы

студент группы П-282

\_\_\_\_\_/ А.В.Миронов /

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Нормоконтролёр, доцент, к.т.н

\_\_\_\_\_/ К.Е.Горшков /

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(Национальный исследовательский университет)  
Политехнический институт. Энергетический факультет  
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»  
Направление 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ / И.М. Кирпичникова /  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

### ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную научную работу магистра  
Миронова Александра Владимировича  
Группа П-282

**1. Тема выпускной квалификационной работы** «Разработка устройства непрерывного анализа состояния электрического контакта» утверждена приказом по университету от « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г. № \_\_\_\_\_

**2. Срок сдачи студентом законченной работы** « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

#### **3. Исходные данные к работе**

- 1) Статьи и нормативно-техническая документация по теме контроля состояния электрического контакта.
- 2) Руководящие документы ПАО «Россети» о порядке инфракрасных обследований.
- 3) Протоколы обследований, замеры нагрузок, переходного сопротивления.
- 4) Программные пакеты MathCad 14, Flir Tools, ThermaCamReporter 7.0.
- 5) Однолинейные схемы оборудования, акты разграничения.

#### **4. Перечень вопросов, подлежащих разработке**

- 1) Обзор исследований о контроле контактных соединений
- 2) Обзор существующих способов контроля состояния электрических контактов.
- 3) Анализ действующего алгоритма теплового контроля.
- 4) Экспериментальное нахождение зависимости переходного сопротивления от температуры.
- 5) Разработка устройства.

## 5. Перечень графического материала

Презентация, выполненная в программе Microsoft PowerPoint.

## 6. Консультанты, с указанием относящихся к ним разделов

Раздел	Консультант	Подпись	
		Задание выдал (консультант)	Задание принял (студент)
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-

## 7. Дата выдачи задания

« 06 » октября 2019 г.

Руководитель работы

\_\_\_\_\_

(подпись)

Задание принял к исполнению

\_\_\_\_\_

(подпись студента)

## КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Дата завершения этапа	Отметка руководителя о выполнении
Анализ литературы и публикаций по теме	13.01.2020 г.	
Анализ применяемых способов контроля контактных соединений	08.02.2020 г	
Анализ действующего порядка тепловизионных обследований	15.03.2020 г	
Выполнение эксперимента с установлением зависимости переходного сопротивления от температуры	28.03.2020 г	
Разработка лабораторного прототипа устройства	26.04.2020 г	
Анализ полученных данных	16.06.2020 г	
Оформление пояснительной записки	29.06.2020 г	
Разработка презентации	30.06.2020 г	

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ / И.М. Кирпичникова /

Руководитель работы \_\_\_\_\_ / В.С.Павлюков/

Студент \_\_\_\_\_ / А.В.Миронов/

## АННОТАЦИЯ

Миронов А.В.. – Разработка устройства непрерывного анализа состояния электрического контакта. – Челябинск: ЮУрГУ, ЭФ, П-282, 2020 г., стр. 54, илл. 16, табл. 20. Список литературы – 12 наименований, приложение 1.

В выпускной квалификационной научной работе выполнена разработка устройства непрерывного анализа состояния электрического контакта. Задачей выполнения была разработка прототипа устройства непрерывного мониторинга состояние контактных соединений для исключения повреждений, связанных с ощутимым ухудшением состояния контактных групп. Для выполнения работы были изучены:

- публикации и нормативно-техническая документация по теме контроля состояния контактных групп,
- применяющиеся способы контроля контактных соединений,
- порядок проведения тепловизионных обследований.

Был произведён эксперимент по установлению зависимости между переходным сопротивлением и температурой соединения и разработан прототип предлагаемого устройства.

В процессе выполнения работ были использованы различные программные пакеты, такие как, MathCad, Microsoft Office, Flir Tools.

					<b>П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР</b>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпис.</i>	<i>Дат.</i>				
<i>Разраб.</i>		Миронов			Разработка устройства непрерывного анализа состояния электрического контакта	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Пров.</i>		Павлюков				В К Р	5	55
<i>Н. контр.</i>		Горшков			ЮУрГУ Кафедра ЭССиСЭ			
<i>Утв.</i>		Кирпичникова						

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
1 ОБЗОР ПУБЛИКАЦИЙ ОБ ИССЛЕДОВАНИИ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТАКТА .....	9
2 АНАЛИЗ СПОСОБОВ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТАКТА .....	11
3 АНАЛИЗ ТЕКУЩЕГО ПОРЯДКА ИНФРАКРАСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	16
3.1 АНАЛИЗ ПРОТОКОЛОВ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	18
3.2 РАСЧЕТ СТЕПЕНИ ДЕФЕКТА ОБОРУДОВАНИЯ И КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ.....	20
3.2.1 Протокол проведения обследований в ТП-1290 .....	21
3.2.2 Протокол проведения обследований в ТП-1087 .....	25
3.2.3 Протокол проведения обследований в ТП-1143 .....	28
Выводы по разделу 3 .....	36
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАХОЖДЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТАКТА.....	37
5 РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА .....	43
5.1 Выбор оборудования для устройства .....	43
5.1.1 Выбор контроллера.....	43
5.1.2 Выбор датчика .....	46
5.1.3 Разработка корпуса устройства .....	47
5.1.4 Разработка программного обеспечения(ПО) .....	49
5.2 Принцип работы устройства непрерывного анализа состояния контакта .....	50
5.3 Перспективы развития .....	52
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	53
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	54
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	55

										Лис
										6
Изм.	Лис	№ докум.	Подпис	Дат	П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР					

## ВВЕДЕНИЕ

От поломок, связанных с ухудшением физико-технических свойств электрического контакта может пострадать любое электрическое оборудование. Электрический контакт во время работы, несомненно, подвергается механическому износу, что приводит к увеличению переходного сопротивления, и как следствие – нагреву места соединения. Нагрев опасен для оборудования своим термическим воздействием: помимо очевидного механического повреждения электрического контакта возможно возгорание и излишний нагрев смежных частей любого устройства. В данной работе предлагается оценивать состояние электрического контакта методом температурного анализа, а не классическими способами.

Несмотря на то, что на сегодняшний день существует несколько аналогов предлагаемого устройства, они не лишены недостатков, таких как:

- высокая стоимость;
- необходимость снятия напряжения;
- сложность в настройке оборудования.

Интересен и предлагаемый метод оценки состояния электрического контакта – существующие способы, применяемые в электроэнергетике позволяют оценить состояние контакта следующими способами: визуальный осмотр, тепловизионные измерения, измерение падения напряжения и измерение переходного сопротивление. Предложенный метод контроля предлагает дать оценку повреждения контактного соединения в сложной технической системе, которая может привести к непредсказуемым социально-технологическим последствиям, путем точечного измерения температуры инфракрасным методом. Методика тепловых обследований электроустановок актуальна по нескольким причинам:

- возможность выявлять дефекты на ранних стадиях
- проведение обследований без снятия напряжения
- возможность прогнозирования сроков и объёмов ремонтных работ

					П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР	Лис
						7
Изм.	Лис	№ докум.	Подпис	Дат		

Необходимость разработки данного устройства состоит в опасности повреждения контактного соединения: нарушение работы контактного соединения в сложной системе может привести к непредсказуемо опасным последствиям как для оборудования, так и для жизни человека. Реализация непрерывности мониторинга контактных соединений позволит заблаговременно планировать проведение ремонтных работ, избегая отказов вызванных ухудшением состояния электрического контакта.

					П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР	Лис
						8
Изм.	Лис	№ докум.	Подпис	Дат		



# 1 ОБЗОР ПУБЛИКАЦИЙ ОБ ИССЛЕДОВАНИИ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТАКТА

На сегодняшний день существует несколько способов контроля состояния контактного соединения электротехнического оборудования. Его состояние на сегодняшний день контролируется с применением следующих методов:

- визуальным контролем;
- тепловизионными исследованиями, так как при увеличении переходного сопротивления увеличивается нагрев контактного соединения;
- измерением переходного сопротивления.

Так же, уже возникшую аварийную ситуацию, связанную с ощутимым ухудшением состояния контакта, может устранить дуговая защита при возникновении электрической дуги.

Разрушительное воздействие электрической дуги и пожаров в электроустановках могут приводить к серьезным последствиям, влияющим как на непрерывный технологический процесс производства, так и на социальную сферу в виду отказа оборудования. Несмотря на то, что наиболее распространенной и опасной аварийной ситуацией в закрытых распределительных устройствах является короткое замыкание, аварии связанные с неправильной настройкой приводов, ножей и контактных соединений ведут к опасным последствиям для электротехнического оборудования.

Исследования методов контроля целостности контактных групп во многом получили развитие после работ шведского исследователя Рагнара Холма, первые издания которого датированы серединой 40-х годов прошлого века. Он установил, что фактическая площадь соприкосновения двух металлов гораздо меньше, по сравнению с фактической площадью соприкосновения контактов. Это объясняется микроскопической шероховатостью поверхностей, загрязнением поверхности оксидной плёнкой и областями проводимости. В основном, дальнейшее изучение данного вопроса сводилось к измерению переходного сопротивления для контроля состояния контактных соединений,

					П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР	Лис
						9
Изм.	Лис	№ докум.	Подпис	Дат		

и влияние различных факторов на этот параметр. Среди таких параметров можно выделить: метеорологический фактор (ветровая нагрузка и температура окружающей среды), токовая нагрузка, протекающая через контактную группу, загрязненность соединений, и влияние химических веществ.

Специалистами компании «Infomatrix» был исследован и подтверждён тезис о структуре развития дефектов контактного соединения. Переходное сопротивление зависит от нагрузки и её длительности. При продолжительной токовой нагрузке, протекающей через электрический контакт, переходное сопротивление плавно возрастает, и при превышении критического значения резко возрастает, что приводит к существенному тепловыделению из-за ухудшения поверхности контактного соединения.

Именно тепловыделение и хорошая теплопроводность металлических проводников привели к изучению состояния контакта способом теплового контроля. С внедрением в энергетику пирометров и тепловизоров, постепенно были разработаны методики инфракрасного анализа оборудования. Весьма существенной следует выделить работу «Пирометрический контроль качества электрических контактных соединений»[6]. В ней была разработана методика теплового анализа посредством расчета приведённой разности температур. Методика актуальна и на сегодняшний день: её видоизмененный образец применяется в ЕЭС России, в частности ПАО «Россети» [3].

					<i>П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР</i>	<i>Лис</i>
						10
<i>Изм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпис</i>	<i>Дат</i>		

## 2 АНАЛИЗ СПОСОБОВ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТАКТА

На сегодняшний день существует несколько способов контроля состояния контакта электротехнического оборудования. Состояния контактного соединения можно рассмотреть тремя способами:

- визуальным контролем;
- тепловизионными исследованиями, так как при увеличении переходного сопротивления увеличивается нагрев контактного соединения;
- измерением переходного сопротивления.

Так же, уже возникшую аварийную ситуацию, связанную с ощутимым ухудшением состояния контакта, может устранить дуговая защита.

Рассмотрим подробнее все имеющиеся способы.

Наиболее простым, и исторически первым, методом контроля контактных соединений, конечно, является регулярный профилактический ремонт и осмотр оборудования. Но в условиях удаленности оборудования, или отсутствия собственного оперативного персонала предприятий, это может стать весьма затруднительным мероприятием. Гораздо продуктивнее в данной ситуации использовать для этого приёмы, связанные с измерением переходного сопротивления или исследования тепловизором.

Следующий способ заключается в использовании микроомметра.

Микроомметр – измерительный прибор, предназначенный для измерения омического сопротивления. Его главное отличие от омметра – возможность проведения измерения малых напряжений: менее 1 мОм.

При использовании микроомметра, переходное сопротивление послужит погрешностью, так как оно повлияет на показания прибора в точках измерения. Чтобы избежать этого, применяется способ четырёх проводного подключения. Сущность способа состоит в том, что используются две пары проводов: по одной паре на измеряемый объект подаётся заданный ток, с помощью другой пары производится измерение напряжения на объекте,

					П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР	Лис
Изм.	Лис	№ докум.	Подпис	Дат		11

пропорционального силе тока и сопротивлению объекта. Провода подсоединяются к выводам измеряемого двухполюсника таким образом, чтобы каждый из токовых проводов не касался непосредственно соответствующего ему провода напряжения, при этом получается, что переходные сопротивления в местах контактов не включаются в измерительную цепь.

На фоне других методов, микроомметр весьма точно может сказать о состоянии контактного соединения: ведь прямое измерение сопротивления контакта является основным критерием по оценке состояния. Так же, несомненное преимущество состоит и в цене: стоимость микроомметра составляет от 50000 рублей. Однако метод измерения сопротивления контакта не лишен недостатков: для использования микроомметра возникает необходимость снятия напряжения с исследуемой части электрического аппарата.

Рассмотрим основные характеристики микроомметров:

измерение значений сопротивления малых и сверхмалых;

- сварных и эквипотенциальных соединений;
- зажимов, клемм, соединителей;
- низкоомных катушек.

Так же микроомметры обладают и дополнительным функционалом:

- автоматический разряд индуктивности после измерения;
- проверка непрерывности заземляющего провода;
- проверка качества соединений.

Основные требования, которые предъявляют к микроомметрам:

- высокая помехоустойчивость;
- возможно передачи данных на ПК;

					П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР	Лис
Изм.	Лис	№ докум.	Подпис	Дат		12

- разные режимы работы.

Наиболее же действенным способом контроля состояния контактного соединения является тепловизор.

Тепловизор — устройство для наблюдения за распределением температуры исследуемой поверхности. Распределение температуры отображается на дисплее как цветная картинка, где разным температурам соответствуют разные цвета. Изучение тепловых изображений называется термографией.

Все тела, температура которых превышает температуру абсолютного нуля излучают электромагнитное тепловое излучение в соответствии с законом Планка. Спектральная плотность мощности излучения (функция Планка) имеет максимум, длина волны которого на шкале длин волн зависит от температуры. Положение максимума в спектре излучения сдвигается с повышением температуры в сторону меньших длин волн (закон смещения Вина). Тела, нагретые до температур окружающего нас мира (-50..+50 градусов Цельсия) имеют максимум излучения в среднем инфракрасном диапазоне (длина волны 7..14 мкм). Для технических целей интересен также диапазон температур до сотен градусов, излучающий в диапазоне 3..7 мкм. Температуры около тысячи градусов и выше не требуют тепловизоров для наблюдения, их тепловое свечение видно невооружённым глазом.

Применение тепловизора в электроустановках заключается в контроле излишнего нагрева токоведущих частей. По закону Джоуля-Ленца, проводники выделяют количество теплоты, равное квадрату тока, помноженному на сопротивление и температуру. В связи с возникновением переходного сопротивления, на электрическом контакте может наблюдаться излишний нагрев, который будет зафиксирован тепловизором.

Наиболее эффективно применение тепловизора для электрооборудования при диагностике электроагрегатов и электроустановок – стоимость компонентов такой системы довольно высока, и важнее сохранить её в

					П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР	Лис
Изм.	Лис	№ докум.	Подпис	Дат		13

рабочем состоянии. Предотвратив выход из строя силовых трансформаторов, трансформаторов тока, автотрансформаторов, выключателей, высокочастотных заградителей, конденсаторов связи и т.п., обеспечивается экономия средств, которые пришлось бы затратить на ремонт.

Функционал недорогого тепловизора базового уровня с диапазоном измеряемых температур до  $+500^{\circ}\text{C}$  позволит решать следующие задачи:

- Технический осмотр контактных элементов и коммуникационных устройств с высоким рабочим напряжением.
- Проверка состояния проводки и электросетей.
- Контроль правильной работы электроагрегатов, установок и машин.

На рисунке 1 показано распределение температуры на экране тепловизора в действующей электроустановке.



Рисунок 1. Распределение температуры на экране тепловизора

Для работы на объектах, где присутствует высокое напряжение, а также для проверки состояния высоковольтных линий электропередач лучше всего подходят профессиональные тепловизоры с высоким разрешением ИК-датчика, оснащённые телеобъективом. Такие приборы обеспечивают эффективный дистанционный контроль, позволяя выполнять тепловизионную съемку с больших расстояний. Стоимость таких приборов несомненно больше, однако использовать их вполне целесообразно из-за широкого применения

данного устройства в обслуживании электроустановок. Основными преимуществами тепловизора являются широта использования, работа в режиме реального времени и отсутствие необходимости снятия напряжения. На сегодняшний день тепловизоры только начинают широко использоваться в ЕЭС России, но, к сожалению, не все компании могут позволить себе приобретение такого дорогостоящего устройства.

В комплексе ПАО «Россети» применение тепловизора широко распространено при диагностике отказов оборудования в открытых и закрытых распределительных устройствах в сетях напряжение от 0,4 кВ до 110 кВ. Анализ результатов тепловизионных исследований позволяет обнаружить дефекты еще на ранних стадиях развития. Целью тепловизионного обследования является определение теплового состояния оборудования, контактов, контактных соединений для своевременного устранения неисправностей в соответствии с требованиями, определения возможности и условий продолжения эксплуатации оборудования.

Для исследования эффективности применения тепловизионного исследования в филиале ПАО «Россети» были проведены соответствующие обследования, в том числе замеры нагрузок и переходного сопротивления

					<i>П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР</i>	<i>Лис</i>
						15
<i>Изм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпис</i>	<i>Дат</i>		

### 3 АНАЛИЗ ТЕКУЩЕГО ПОРЯДКА ИНФРАКРАСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На данный момент для определения теплового состояния оборудования и контактных соединений в ПАО «Россети» проводятся тепловизионные обследования. Тепловизионный контроль электрооборудования и воздушных линий электропередачи предусмотрен РД 34.45-51.300-97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования»[3] и выполнен согласно РД 153-34.0-20.363-99 «Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и воздушных линий»[4]. Утвержден Департаментом стратегии развития и научно-технической политики РАО "ЕЭС России" 14.12.99 г. Введен впервые в 2000 году ввиду внедрения приборов инфракрасной техники (ИКТ) в энергетику. В действительности, это одно из наиболее существенных направлений развития систем диагностики электрооборудования и электроустановок, позволяющее выявлять дефекты на ранней стадии развития без остановки технологического процесса производства и распределения электрической энергии, так как позволяет проводить диагностику без вывода в ремонт. Последние изменения в данный руководящий документ внесены в 2017 году.

Установлена периодичность тепловизионного контроля электрооборудования распределительных устройств не реже:

- а) на напряжение 330-500 кВ – один раз в год;
- б) на напряжение 110-220 кВ – один раз в два года;
- в) на напряжение 35 кВ и ниже – один раз в три года.

В публикациях наиболее точные исследования теплового контроля контактных соединений описаны А.В. Баталовой[6]. Выражение, описывающее связь переходного сопротивления и нагрева контактного соединения можно вывести из закона Джоуля-Ленца. Тепловая мощность, выделяемая контактным соединением:

					<i>П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР</i>	<i>Лис</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпис</i>	<i>Дат</i>		16



$$Q = I^2(R_{\text{п}} + R_{\text{к}}) ,$$

где  $I$  – ток протекающий через контактное соединение, А;

$R_{\text{п}}$  - переходное сопротивление, Ом;

$R_{\text{к}}$  - сопротивление токоподводящего участка.

В дальнейшем, с помощью коэффициента дефектности выводится аналитическое выражение:

$$I^2(R_{\text{п}} + R_{\text{к}}) = 2\alpha S_1(T_{\text{п}} - T_{\text{с}}) + \varepsilon\sigma \cdot S_2(T_{\text{п}}^4 - T_{\text{с}}^4),$$

где  $T_{\text{с}}$  – температура окружающей среды, К;  $\alpha$  – коэффициент теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup>;  $\varepsilon$  - коэффициент излучения тепло материала;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>К<sup>4</sup> - постоянная Стефана-Больцмана;  $S_1$  - площадь боковой поверхности соединения, м<sup>2</sup>.

В данном выражении, первое слагаемое в правой части определяется законом Ньютона-Рихмана о конвективном теплообмене контактного соединения в воздухе, а второе слагаемое – в соответствии с законом Планка о лучистом теплообмене. Рассматривая далее методику расчетов, применяемую на практике, можно заметить, что теплообмен со средой учтён в виде применения коэффициента коррекции  $K_{\text{в}}$ .

Для анализа проводимых обследований были рассмотрены некоторые протоколы тепловизионного контроля оборудования, акты устранения дефектов, и замеры нагрузок. Рассмотрев термограммы и расчеты избыточных температур можно сделать выводы о степени неисправности оборудования, и в частности, контактных соединений.

Введем необходимые определения для анализа отчётов об исследованиях.

Превышение температуры — разность между измеренной температурой нагрева и значением температуры окружающего воздуха.

Избыточная температура — превышение измеренной температуры контролируемого узла одной фазы над температурой аналогичных узлов других фаз (с наименьшей температурой нагрева) или заведомо исправного узла.

					<i>П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР</i>	<i>Лис</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпис</i>	<i>Дат</i>		<i>17</i>

Расчетная избыточная температура - расчетное значение избыточной температуры, приведенное к номинальному или к половине номинального значения тока и с учетом ветровой нагрузки.

### 3.1 АНАЛИЗ ПРОТОКОЛОВ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной работе были проанализированы расчеты в протоколах тепловизионных обследований. По результатам расчетов классифицируются дефекты контактных соединений или оборудования в соответствии со степенью дефекта, что отражено в таблице 1.

Таблица 1- Классификация дефектов

Степень дефекта	Значение избыточной температуры, $\Delta T_{расч}$ при токе нагрузки; °С,		Классификация дефекта, рекомендация
	$0,5I_{ном}$	$I_{ном}$	
1	5 – 10	10 – 20	Начальная степень развития дефекта, которую следует держать под контролем
2	10 – 30	20 – 40	Развившийся дефект, устранение дефекта при возможности
3	$\geq 30$	$\geq 40$	Аварийный дефект, требующий немедленного устранения

Следовательно, для того что бы сделать вывод о состоянии той или иной контактной группы после рассмотрения термограмм, всё сводится к расчету значения  $\Delta T_{расч}$  – значения избыточной температуры, то есть превышения

значения температуры на контролируемом узле одной фазы над температурой аналогичного узла другой фазы.

Рассмотрим методику вычисления подробнее. Согласно [3],

$$\Delta T_{\text{расч}} = \Delta T_{\text{н}} K_{\text{в}},$$

где  $\Delta T_{\text{н}}$  – расчетное значение превышения температуры по току нагрузки;

$K_{\text{в}}$  – коэффициент коррекция от скорости ветра.

Значение превышения температуры по току нагрузки рассчитывается в зависимости от нагрузки контролируемого узла. Формулы расчета приведены в таблице 2.

Таблица 2- Формулы для вычисления  $\Delta T_{\text{н}}$  в зависимости от нагрузки

Токковая нагрузка в момент исследования, $I_{\text{раб}}$	Формула для вычисления
$(0,6 - 1,0) I_{\text{ном}}$	$\Delta T_{\text{н}} = \Delta T_{\text{раб}} (I_{\text{ном}} / I_{\text{раб}})^2$
$(0,3 - 0,6) I_{\text{ном}}$	$\Delta T_{\text{н}} = \Delta T_{\text{раб}} (0,5 I_{\text{ном}} / I_{\text{раб}})^2$

В таблице 2:

$I_{\text{раб}}$  – токковая нагрузка в момент обследования;

$I_{\text{ном}}$  – номинальный ток обследуемого оборудования;

$\Delta T_{\text{раб}}$  – измеренная избыточная температура при рабочем токе.

Коэффициенты коррекции избыточной температуры от скорости ветра указаны в таблице 3.

Таблица 3 - Коэффициент коррекции в зависимости от скорости ветра

Скорость ветра, м/с	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
Коэффициент коррекции $K_{\text{в}}$	1,0	1,36	1,64	1,86	2,0	2,23	2,4	2,5

Далее будут приведены термограммы и исходные данные для вывода о состоянии контактного соединения и оборудования. Для расчета были использованы данные реальных протоколов обследований, замеры нагрузок и данные оборудования одного из филиалов ОАО «МРСК Урала».

### 3.2 РАСЧЕТ СТЕПЕНИ ДЕФЕКТА ОБОРУДОВАНИЯ И КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Для удобства выделим необходимые исходные данные для расчета в таблицу 4.

Таблица 4-Исходные данные для расчета

Ar1 max, °C	Ar2 max, °C	$\Delta T_{\text{раб}}$ , °C	$I_{\text{ном}}$ , А	$I_{\text{раб}}$ , А	$K_{\text{в}}$

В таблице 4:

$Ar1 \text{ max, } ^\circ\text{C}$  – максимальная температура в исследуемом узле 1;

$Ar2 \text{ max, } ^\circ\text{C}$  – максимальная температура в исследуемом узле 2;

$\Delta T_{\text{раб}}$ , °C – разность температур исследуемых узлов(измеренная избыточная температура);

$I_{\text{ном}}$  – номинальный ток обследуемого оборудования;

$I_{\text{раб}}$  – токовая нагрузка в момент обследования;

$K_{\text{в}}$  – коэффициент коррекции ветрового воздействия.

Для расчета был использован программный пакет MathCad 14. Так же, для правильности проведения расчетов необходимо учесть следующее примечание: Инфракрасный контроль необходимо проводить при нагрузке, не менее чем 30% от номинальной. В противном случае, невозможно выявление дефекта на ранней стадии развития

Для измерения были использованы тепловизоры ThermaCAM P65, Flir T640, токоизмерительные клещи M266F, APPA 30R. Обработка результатов была произведена в программных пакетах ThermaCamReporter 7.0, и Flir Tools.

Также, для уточнения номинальных токов оборудования, необходимых при расчетах были использованы однолинейные схемы и каталожные данные заводов-изготовителей электрооборудования. Эти данные были необходимы для использования в формуле расчета значения превышения температуры по току нагрузки.

### 3.2.1 Протокол проведения обследований в ТП-1290

Тепловизионное обследование оборудования в ТП-1290 было проведено 24.09.2019 в 9:00 при температуре окружающего воздуха  $t=11\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

По результатам обследования были намечены два узла, в которых предполагается развитие дефекта. В первом случае – был зафиксирован избыточный нагрев в распределительном устройстве (РУ) 0,4кВ 1С гр.8 на контактном соединении трансформатора тока фазы «А» с ПН. На рисунке 4 представлена термограмма оборудования.

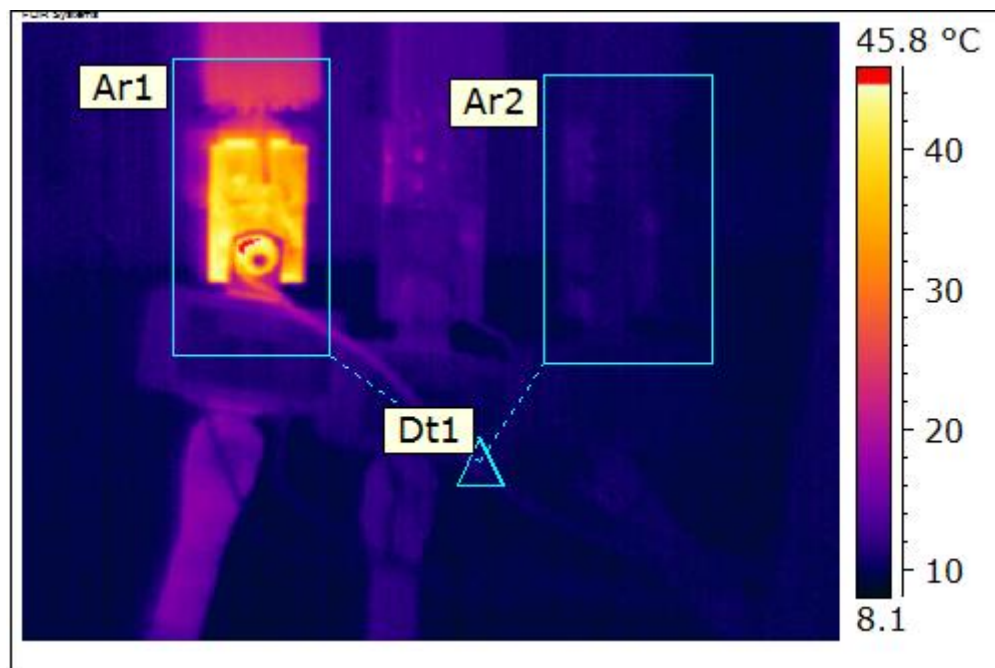


Рисунок 2. Термограмма оборудования

В данном рисунке Dt1 – разность максимальных температур в исследуемых узлах Ar1 и Ar2. В дальнейших расчетах, Dt1 -  $\Delta T_{\text{расч}}$ , то есть расчетное значение избыточной температуры. В таблице 5 представлены измеренные значения температур.

Таблица 5- Полученные на термограмме значения температур в исследуемых узлах в ТП-1290 1С гр.8

Ar1: Макс	45.6 °С
Ar2: Макс	13.0 °С
Iso1	44.4 °С
Dt1	32.6 °С

Перенесем данные полученные в таблице 5, и добавим значения нагрузок в момент инфракрасного исследования в таблицу 6 для вывода о состоянии контактной группы.

Таблица 6 - Исходные данные для вывода о дефекте

Ar1 max, °С	Ar2 max, °С	$\Delta T_{\text{раб}}$ , °С	$I_{\text{ном}}$ , А	$I_{\text{раб}}$ , А	$K_{\text{в}}$
45,6	13,0	32,6	200	66	1,0

На рисунке 3 представлены расчеты избыточной температуры.

$$A_{r1} := 45.6$$

$$A_{r2} := 13.0$$

$$I_{раб} := 66$$

$$I_{ном} := 200$$

$$K_{в} := 1.0$$

$$T_{раб} := A_{r1} - A_{r2}$$

$$T_{н} := \begin{cases} \left( \frac{0.5 \cdot I_{ном}}{I_{раб}} \right)^2 \cdot T_{раб} & \text{if } 0.3 \cdot I_{ном} \leq I_{раб} \leq 0.6 \cdot I_{ном} \\ \left( \frac{I_{ном}}{I_{раб}} \right)^2 \cdot T_{раб} & \text{if } 0.6 \cdot I_{ном} \leq I_{раб} \leq I_{ном} \end{cases}$$

$$T_{раб} = 32.6$$

$$T_{н} = 74.839$$

$$T_{расч} := T_{н} \cdot K_{в} = 74.839$$

Так как  $T_{расч} > 40$ , выявлен аварийный дефект

Рисунок 3. Расчет избыточной температуры в программном пакете MathCad  
14

Так как согласно [3], полученное расчетное значение превышает  $40^{\circ}\text{C}$  – можно сделать вывод об аварийном дефекте рассмотренного контактного соединения.

Так же, по результатам термограмм был выявлен другой предполагаемый дефектный узел: РУ 0,4кВ 1С гр.5 на контактном соединении РПС с шинами на фазе «В». На рисунке 4 представлена термограмма данной контактной группы.

					П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР	Лис
Изм.	Лис	№ докум.	Подпис	Дат		23

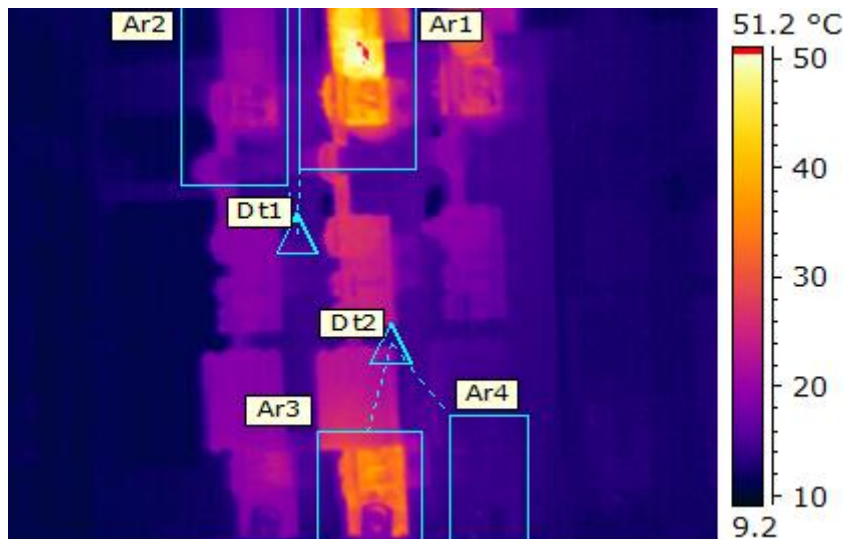


Рисунок 4.Термограмма оборудования

На данной термограмме выделено четыре контролируемых узла: избыточный нагрев обнаружен сразу в двух узлах одноименной фазы, и необходимо сравнение данных узлов с другой фазой.

В таблице 7 представлены измеренные значения температур.

Таблица 7 -Измеренные значения температур

Ar1: Макс	51.2 °C
Ar2: Макс	25.3 °C
Ar3: Макс	38.1 °C
Ar4: Макс	15.7 °C
Iso1	50.3 °C
Dt1:	25.9 °C
Dt2:	22.4 °C

По аналогии с анализом предыдущего присоединения представим исходные данные в таблице, и проведем расчеты. Воспользуемся участками Ar1 и Ar2 термограмм, так как по ним выявлено большее превышение температур. Данные отражены в таблице 8.

Таблица 8.-Исходные данные для вывода о дефекте.

Ar1	Ar2	$\Delta T_{\text{раб}}$	$I_{\text{ном}}$	$I_{\text{раб}}$	$K_{\text{в}}$
-----	-----	-------------------------	------------------	------------------	----------------



max	max				
51,2	25,3	25,9	250	38	1,0

В данном случае нагрузка на присоединении во время замера составила 15,2% от номинальной. Обращаясь к примечаниям из главы 4.2, делаем вывод, о недопустимости проведения расчетов из-за существенных ошибок при пересчёте. Однако, визуально заметный на термограмме нагрев одного узла относительно другого, уже говорит о том, что зафиксировано дефектное состояние исследуемого контактного соединения.

### 3.2.2 Протокол проведения обследований в ТП-1087

Тепловизионное обследование оборудования в ТП-1087 было проведено 14.04.2020 в 10:00 при температуре окружающего воздуха  $t=13\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Методика проведения обследования и анализа результатов аналогична пункту 4.2.1

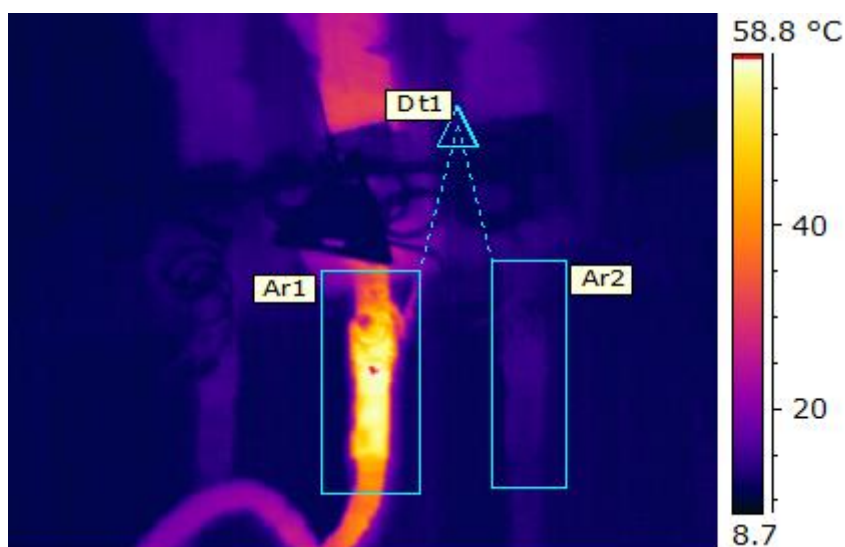


Рисунок 5. Термограмма наконечника кабеля в ТП-1087 1С 0,4кВ гр.1 фазы «А».

Запишем полученные температуры и данные нагрузок в таблицу 9. Значение  $I_{\text{ном}}$  выбрано исходя из длительно-допустимой нагрузки данного кабеля.

Таблица 9-Исходные данные для анализа термограмм в ТП-1087 РУ 0,4 кВ  
1С 1гр.

Ar1 max, °C	Ar2 max, °C	$\Delta T_{\text{раб}}$ , °C	I <sub>НОМ</sub> , А	I <sub>раб</sub> , А	K <sub>B</sub>
58,6	15,2	43,4	146	61	1,0

На рисунке 6 представлены расчеты данных термограмм.

$$\begin{aligned} Ar_1 &:= 58.6 & Ar_2 &:= 15.2 \\ I_{\text{раб}} &:= 61 & I_{\text{НОМ}} &:= 146 & K_B &:= 1.0 \end{aligned}$$

+

$$T_{\text{раб}} := Ar_1 - Ar_2$$

$$T_H := \begin{cases} \left( \frac{0.5 \cdot I_{\text{НОМ}}}{I_{\text{раб}}} \right)^2 \cdot T_{\text{раб}} & \text{if } 0.3 \cdot I_{\text{НОМ}} \leq I_{\text{раб}} \leq 0.6 \cdot I_{\text{НОМ}} \\ \left( \frac{I_{\text{НОМ}}}{I_{\text{раб}}} \right)^2 \cdot T_{\text{раб}} & \text{if } 0.6 \cdot I_{\text{НОМ}} \leq I_{\text{раб}} \leq I_{\text{НОМ}} \end{cases}$$

$$T_{\text{раб}} = 43.4$$

$$T_H = 62.155$$

$$T_{\text{расч}} := T_H \cdot K_B = 62.155$$

Так как  $T_{\text{расч}} > 40$ , выявлен аварийный дефект

Рисунок 6. Расчеты в программном пакете MathCad14.

По результатам термограмм выявлен аварийный дефект, требующий устранения.

Аналогичный нагрев обнаружен на второй секции сборных шин, на опрессовке кабеля на отходящей группе 1. На рисунке 7 представлена термограмма.

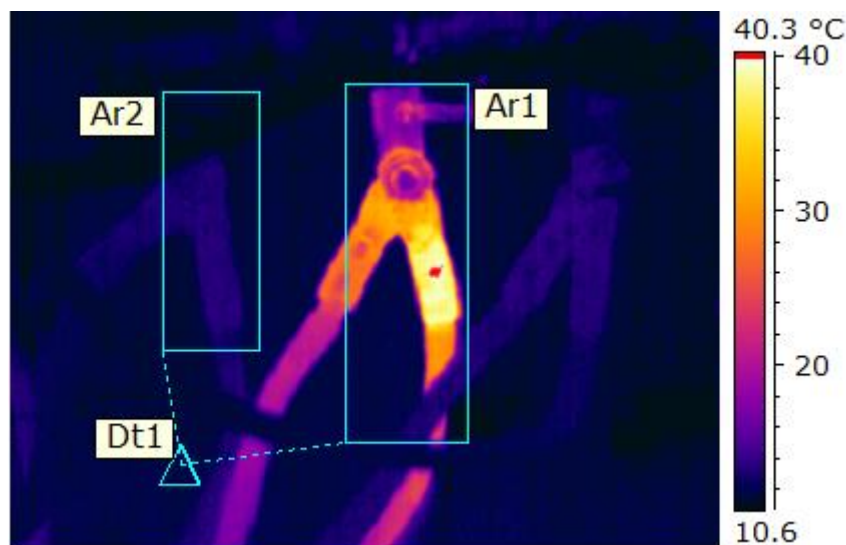


Рисунок 7. Термограмма наконечника кабеля в ТП-1087 2С гр.1 РУ 0,4кВ фазы «В».

Данные термограммы и нагрузок сведены в таблицу 10.

Таблица 10 -Исходные данные для анализа термограмм в ТП-1087 РУ 0,4 кВ 2С 1гр.

Ar1 max, °C	Ar2 max, °C	$\Delta T_{\text{раб}}$ , °C	$I_{\text{ном}}$ , А	$I_{\text{раб}}$ , А	$K_{\text{в}}$
38,7	14,1	24,6	113	35	1,0

Расчеты, необходимые для вывода о наличии дефекта представлены на рисунке 8.

$$\begin{aligned}
 Ar_1 &:= 28.7 & Ar_2 &:= 14.1 \\
 I_{раб} &:= 35 & I_{ном} &:= 113 & Kв &:= 1.0
 \end{aligned}$$

$$T_{раб} := Ar_1 - Ar_2$$

$$T_{н} := \begin{cases} \left(\frac{0.5 \cdot I_{ном}}{I_{раб}}\right)^2 \cdot T_{раб} & \text{if } 0.3 \cdot I_{ном} \leq I_{раб} \leq 0.6 \cdot I_{ном} \\ \left(\frac{I_{ном}}{I_{раб}}\right)^2 \cdot T_{раб} & \text{if } 0.6 \cdot I_{ном} \leq I_{раб} \leq I_{ном} \end{cases}$$

$$T_{раб} = 14.6$$

$$T_{н} = 38.046$$

$$T_{расч} := T_{н} \cdot Kв = 38.046$$

Рисунок 8 . Расчеты в программном пакете MathCad 14.

По результатам расчетов, расчетное значение избыточной температуры находится в промежутке от 20 до 40 градусов, следовательно обнаружено развитие дефекта, не требующее срочного вмешательства, но требующее устранения по возможности.

### 3.2.3 Протокол проведения обследований в ТП-1143

Тепловизионное обследование оборудования в ТП-1143 было проведено 26.03.2020 в 10:15 при температуре окружающего воздуха  $t=8$  °С.

В данном трансформаторном пункте выявлены излишние нагревы в 4 узлах: 3 узла распределительных устройствах 0,4 кВ и один – в распределительных устройствах 6 кВ. Рассмотрим термограммы и расчеты избыточного превышения температур на рисунке 9.

					П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР	Лис
Изм.	Лис	№ докум.	Подпис	Дат		28



Рисунок 9. Термограмма оборудования ТП-1143 РУ 0,4кВ 1С гр.3 фазы «С».

Запишем полученные данные в таблицу 11.

Таблица 11 -Исходные данные для анализа термограмм в ТП-1087 РУ 0,4 кВ 2С 1гр.

Ar1 max, °C	Ar2 max, °C	$\Delta T_{\text{раб}}$ , °C	$I_{\text{ном}}$ , А	$I_{\text{раб}}$ , А	$K_{\text{в}}$
87,0	30,9	46,1	100	40	1,0

На рисунке 10 представлены расчеты по аналогии с предыдущими пунктами.

$Ar_1 := 87$                        $Ar_2 := 30.9$   
 $I_{раб} := 40$                        $I_{ном} := 100$                        $K_B := 1.0$

$$T_{раб} := Ar_1 - Ar_2 \quad +$$

$$T_H := \begin{cases} \left(\frac{0.5 \cdot I_{ном}}{I_{раб}}\right)^2 \cdot T_{раб} & \text{if } 0.3 \cdot I_{ном} \leq I_{раб} \leq 0.6 \cdot I_{ном} \\ \left(\frac{I_{ном}}{I_{раб}}\right)^2 \cdot T_{раб} & \text{if } 0.6 \cdot I_{ном} \leq I_{раб} \leq I_{ном} \end{cases}$$

$$T_{раб} = 56.1$$

$$T_H = 87.656$$

$$T_{расч} := T_H \cdot K_B = 87.656$$

Так как  $T_{расч} > 40$ , выявлен аварийный дефект

Рисунок 10. Расчеты в программном пакете MathCad 14.

По результатам анализа термограммы ТП-1143 1С 0,4кВ гр.3 фазы «С» обнаружен аварийный дефект контактного соединения наконечника кабеля с ПН.

Продолжим рассмотрение термограмм рисунком 11 и таблицей 12.



Рисунок 11. Термограмма оборудования ТП-1143 РУ 0,4кВ 1С гр.2 ПН 0,4кВ фазы «В».

Таблица 12-Исходные данные для анализа термограмм в ТП-1143 РУ 0,4 кВ 1С гр.2 фазы «В»

Ar1 max, °C	Ar2 max, °C	$\Delta T_{\text{раб}}$ , °C	$I_{\text{ном}}$ , А	$I_{\text{раб}}$ , А	$K_B$
157,4	46,8	110,6	250	46	1,0

В данном случае невозможно воспользоваться методикой расчета значения избыточной температуры, так как фактическая нагрузка в момент замеров составила менее 30% от номинальной. С учётом примечаний пункта 4.2, при нагрузке в 18,4% от номинальной невозможно выявление дефектов на ранней стадии, или же возможна ошибка при пересчетах. Однако, в рассмотренном узле превышение температуры контролируемого узла над аналогичным узлом другой фазы составило 110 °C. В соответствии с [3], где указано наибольшее допустимое превышение температуры для контактных соединений из меди и сплавов равно 90°C следует вывод, что рассмотренное контактное соединение является дефектным, требующим немедленного устранения. Так же, превышена и максимально допустимая температура нагрева.

Перейдем к рисунку 12.



Рисунок 12 - Термограмма оборудования ТП-1143 РУ 0,4кВ 1С гр.7 ПН 0,4 кВ фазы «В».

На рисунке 12 зафиксированы два узла с излишней температурой нагрева, отмеченные на рисунке областями Ar1 и Ar3.

Данные замеров нагрузок и термограмм представлены в таблицах 13 и 14

Таблица 13.-Исходные данные для анализа термограмм в ТП-1143 РУ 0,4 кВ 1С гр.7 фазы «В»

Ar1 max, °C	Ar2 max, °C	$\Delta T_{\text{раб}}$ , °C	$I_{\text{ном}}$ , А	$I_{\text{раб}}$ , А	$K_{\text{в}}$
65,5	39,8	25,7	160	69	1,0

Расчеты проведены на рисунке 13.

$$\begin{aligned} Ar_1 &:= 65.5 & Ar_2 &:= 39.8 \\ I_{\text{раб}} &:= 69 & I_{\text{ном}} &:= 160 & K_{\text{в}} &:= 1.0 \end{aligned}$$

$$T_{\text{раб}} := Ar_1 - Ar_2$$

+

$$T_{\text{н}} := \begin{cases} \left( \frac{0.5 \cdot I_{\text{ном}}}{I_{\text{раб}}} \right)^2 \cdot T_{\text{раб}} & \text{if } 0.3 \cdot I_{\text{ном}} \leq I_{\text{раб}} \leq 0.6 \cdot I_{\text{ном}} \\ \left( \frac{I_{\text{ном}}}{I_{\text{раб}}} \right)^2 \cdot T_{\text{раб}} & \text{if } 0.6 \cdot I_{\text{ном}} \leq I_{\text{раб}} \leq I_{\text{ном}} \end{cases}$$

$$T_{\text{раб}} = 25.7$$

$$T_{\text{н}} = 34.547$$

$$T_{\text{расч}} := T_{\text{н}} \cdot K_{\text{в}} = 34.547$$

Рисунок 13 – Расчёты в программном пакете MathCad14

В рассмотренном узле Ar1 в ТП-1143 РУ 0,4кВ 1С гр.7 ПН 0,4кВ фазы «В» расчетное значение избыточной температуры находится в промежутке от



20 до 40 градусов, следовательно обнаружено развитие дефекта, не требующее срочного вмешательства, но требующее устранения по возможности.

Таблица 14.-Исходные данные для анализа термограмм в ТП-1143 РУ 0,4 кВ 1С гр.7 опрессовки наконечника кабеля фазы «А»

Ar1 max, °C	Ar2 max, °C	$\Delta T_{\text{раб}}$ , °C	$I_{\text{ном}}$ , А	$I_{\text{раб}}$ , А	$K_{\text{в}}$
56,7	35,9	20,8	160	58	1,0

Аналогично, представлены расчеты по исследуемому узлу на рисунке 14.

$$Ar_1 := 56.7$$

$$Ar_2 := 35.9$$

$$I_{\text{раб}} := 58$$

$$I_{\text{ном}} := 160$$

$$K_{\text{в}} := 1.0$$

$$T_{\text{раб}} := Ar_1 - Ar_2 \quad +$$

$$T_{\text{н}} := \begin{cases} \left( \frac{0.5 \cdot I_{\text{ном}}}{I_{\text{раб}}} \right)^2 \cdot T_{\text{раб}} & \text{if } 0.3 \cdot I_{\text{ном}} \leq I_{\text{раб}} \leq 0.6 \cdot I_{\text{ном}} \\ \left( \frac{I_{\text{ном}}}{I_{\text{раб}}} \right)^2 \cdot T_{\text{раб}} & \text{if } 0.6 \cdot I_{\text{ном}} \leq I_{\text{раб}} \leq I_{\text{ном}} \end{cases}$$

$$T_{\text{раб}} = 20.8$$

$$T_{\text{н}} = 39.572$$

$$T_{\text{расч}} := T_{\text{н}} \cdot K_{\text{в}} = 39.572$$

Рисунок 14. Расчёты в программном пакете MathCad14

Для анализируемого узла Ar3 в ТП-1143 РУ 0,4кВ 1С гр.7 наконечник кабеля фазы «А» расчетное значение избыточной температуры находится в промежутке от 20 до 40 градусов, как и в предыдущем случае, что говорит о дефекте, требующем устранения по возможности.

В распределительном устройстве 6 кВ трансформаторного пункта ТП-1143 в ячейке в сторону ТП-1140 при инфракрасном исследовании выявлено

превышение температуры на контактном соединении выключателя нагрузки ВН-10 6/400 ПРА-17 (с приводом ручным автоматическим) с шинами. Термограмма представлена на рисунке 15.

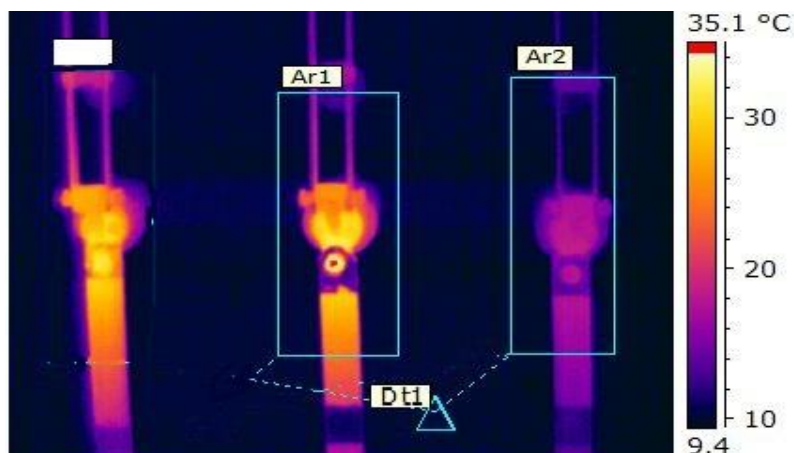


Рисунок 15. Термограмма контактного соединения ВН с шинами в РУ 6кВ ТП-1143.

В связи с отсутствием данных о токовой нагрузке в момент проведения тепловизионного обследования не удалось рассчитать избыточную температуру рассматриваемого узла. Однако, в протоколе обследования присутствует запись о том, что необходим учащенный контроль данного узла. На рассмотренной термограмме зафиксирована максимальная температура контактного соединения, равная 35,1°С.

Во время прохождения преддипломной практики был рассмотрен порядок по устранению дефектов электротехнического оборудования, требующего контроля или устранения дефектов после выполнения исследований. Контактное соединение выключателя нагрузки ВН-10 6/400 ПРА-17 с шинами после визуального осмотра обслуживающим персоналом было принято для внесения в список ремонтов. В предоставленном акте устранения дефектов оборудования были представлены замеры переходного сопротивления для описанной контактной группы.

Согласно нормам, изложенным в правилах устройства электроустановок (седьмое издание) переходное сопротивление для коммутационного

оборудования в сетях напряжением 110-500 кВ соответствовало рекомендациям заводов-изготовителей. Исключение составляют разъединители типа РОНЗ и ЛРН [1]. Необходимо отметить, что для оборудования напряжением ниже указанного не регламентированы допустимые значения переходного сопротивления, однако, согласно [4], значения переходного сопротивления должно соответствовать данным заводами-изготовителями оборудования или аналогичным, если не указаны рекомендации о значениях.

Для выключателей нагрузки с номинальным током 400А принято считать допустимым переходное сопротивление 130мкОм, а для выключателей нагрузки с номинальным током 600А – 100 мкОм соответственно. В таблице 15 указаны замеры переходных сопротивлений в трансформаторном пункте ТП-1143.

Таблица 15 – замеры переходных сопротивлений в ТП-1143

Ячейка РУ	Тип оборудования	Номинальный ток, А	Нормативное значение сопротивления, мкОм	Измеренное переходное сопротивление, мкОм			Заключение
				ф. «А»	ф. «В»	ф. «С»	
Разрядник	РВ-6	600	175	151	152	154	годно
Т1	РВ-6	600	175	142	147	147	годно
ТП1143 – ТП1140	ВН-10 6/400	400	130	112	111	114	годно

По результатам замеров переходных сопротивлений, указанных в таблице выше, измеренные значения соответствуют рекомендациям завода-изготовителя. Это говорит об устранении дефекта после анализа термограммы.

### Выводы по разделу 3

После анализа термограмм и данных, полученных после инфракрасных исследований необходимо отметить, что в случае если токовая нагрузка исследуемого узла мала относительно номинального тока рассматриваемого узла – невозможно определить дефект на начальной стадии его развития. Так же, в некоторых случаях возможны грубые ошибки при пересчете значений избыточной температуры. Однако, способ контроля состояния контактных соединений посредством тепловизионных исследований доказал свою состоятельность. Проведение замеров переходного сопротивления, по результатам которых переходное сопротивление соответствует данным завода-изготовителя, наглядно иллюстрирует состояние контактных групп до и после проведения ремонтных работ. Снижение нагревов электротехнического оборудования после обслуживания контактных соединений требует дополнительного изучения.

					<i>П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР</i>	<i>Лис</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпис</i>	<i>Дат</i>		36

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАХОЖДЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТАКТА

Для обоснования принципа работы прототипа устройства разработана методика измерения сопротивления, и получение зависимости между температурой и величиной сопротивления.

Целью опыта является нахождение зависимости температуры болтового контактного соединения двух медных шин от переходного сопротивления этого контактного соединения.

Согласно ГОСТ 8024-90 «Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В», рабочая температура болтовых контактных соединений электрооборудования из меди без покрытия на открытом воздухе не должна превышать 75 градусов по Цельсию, допустимое превышение температуры над эффективной температурой окружающего воздуха не должно превышать 35 градусов по Цельсию, а температура данных соединений при аварии не должна превышать 140 градусов по Цельсию[10], так как при превышении данных предельных значений возможна потеря различных физических свойств и разрушение элементов вследствие ускоренной коррозии.

Несмотря на наличие ГОСТ, регулирующего параметр состояния электрического контакта, переходное сопротивление не нормируется, несмотря на то, что несомненно состояние контакта можно оценить измерением этого сопротивления. Тем не менее, при выполнении опыта согласно данному ГОСТ, необходимо соблюсти указанные требования, для снижения влияния некоторых факторов.

Приведем условия, указанные в ГОСТ 8024-90:

- Испытанию на нагрев подвергают полностью собранный аппарат с новыми контактами, установленными в эксплуатационном положении

					П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР	Лис
Изм.	Лис	№ докум.	Подпис	Дат		37

(вертикальном, горизонтальном и др.), при котором возможен наибольший нагрев его частей.

- Перед испытаниями измеряют общее и (или) по элементам сопротивление токоведущего контура, если значение сопротивления этих элементов установлено в конструкторской документации.

- Допускается не испытывать на нагрев аппараты, прошедшие испытания на ресурс по механической стойкости или на механическую износостойкость, если сопротивление токоведущего контура и (или) отдельных его элементов не превышает норм, установленных в конструкторской документации.

- Аппарат испытывают током, равным номинальному (наибольшему рабочему первичному - для трансформаторов тока).

- Материал временных подсоединений, их сечение и расположение, характеристика поверхности (окрашена и др.), наличие теплоизоляции или отвода тепла должны быть приведены в протоколе испытаний.

- Нагрев аппарата при испытании следует продолжать до достижения установившегося теплового режима[10].

Для проведения исследования использовались тепловизор Fluke Ti400, микроомметр БСЗ-010-1 и источник тока. Приведем каталожные данные тепловизора и микроомметра, использованных при исследовании в таблице 16,17.

Таблица 16 – Каталожные данные микроомметра БСЗ-010-1

Параметр	Значение
Диапазон измеряемых сопротивлений	100 нОм - 1 Ом
Основная приведенная погрешность, %, не более	0,1 - 0,2
Измерительный ток, А, не более	3,0
Длина входных кабелей, м	15

Диапазон рабочих температур, °С	от -5 до +40
Питание прибора от сети частотой 50 Гц, В	220
Потребляемая мощность, Вт, не более	90
Габаритные размеры, мм	340x295x152
Вес, кг, не более	6

Таблица 17 – Каталожные данные тепловизора Fluke Ti400

Характеристики	
Температура:	
Диапазон измеряемых температур (не калибруется ниже – 10 °С)	от -20 °С до +1200 °С (от -4 °F до +2192 °F)
Погрешность измерения температуры	±2 °С или 2 % (при номинальной температуре 25 °С, выбирается большее значение)
Экранная компенсация фоновой температуры	Да
Экранная подстройка пропускания	Да
Качество изображений	
Частота обновления изображения	Частота обновления 9 Гц или 60 Гц, в зависимости от модели
ИК-разрешение	320 x 240 (76,800 пикселей)

Изм.	Лис	№ докум.	Подпис	Дат

П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР

Лис

39

Тепловая чувствительность (NETD)	$\leq 0,05$ °C при температуре объекта 30 °C (50 мК)
Всего пикселей, тыс.	76,800
Спектральный диапазон ИК	от 7,5 до 14 мкм (длинноволновый)
Фотокамера видимого диапазона	Для промышленного применения, 5,0 мегапикселя
Стандартный тип инфракрасных объективов	
Поле зрения	24 ° x 17 °
Пространственная разрешающая способность (IFOV)	1,31 мрад
Минимальное расстояние фокусировки	15 см

Алгоритм выполнения эксперимента: в начале исследования было измерено переходное сопротивление болтового соединения при помощи микроомметра БСЗ-010-1 до подачи тока на шины, то есть при температуре помещения. Затем с помощью источника тока был подан ток на шины, для того чтобы на контактном соединении появился нагрев. При достижении определенного значения тока на шинах, источник тока отключался, и было произведено измерение сопротивления контакта до его остывания. Так же температура фиксировалась при помощи тепловизора. Затем, для определения влияния переходного сопротивления, контакт ослаблялся. Ослабление болтового соединения приводит к увеличению переходного сопротивления, и последующему нагреву. Данные шаги были повторены для получения нескольких значений и последующего построения графической зависимости.

					П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР	Лис
Изм.	Лис	№ докум.	Подпис	Дат		40



Сведем полученные экспериментальные данные в таблицу 18.

Таблица 18– Зависимость переходного сопротивления болтового контактного соединения от температуры

$R_K$ , мкОм	$t$ , °С
150	20
154	25
163	63
180	85

Полученные данные не соответствуют ГОСТ-8024-90, так как превышена рабочая температура болтовых контактных соединений электрооборудования из меди без покрытия на открытом воздухе. Однако, опыт подтверждает что изменение переходного сопротивления связано с состоянием контактного соединения и ведет к излишнему нагреву контакта. Неудовлетворительные результаты могли быть вызваны погрешностью при измерениях, загрязнением электрического контакта.

На рисунке 15 построена графическая зависимость температуры от сопротивления электрического контакта.

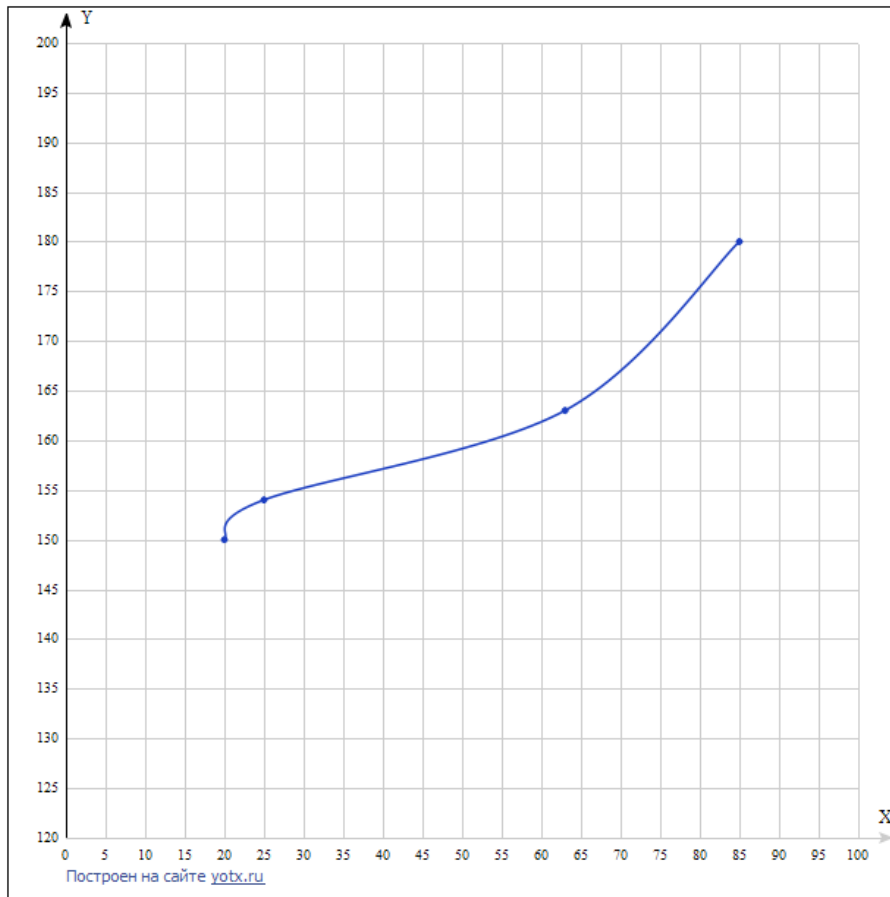


Рисунок 15 – Зависимость переходного сопротивления болтового контактного соединения от температуры.

## 5 РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА

### 5.1 Выбор оборудования для устройства

Выбор оборудования производится в результате технических испытаний, которые должен пройти каждый аппарат, перед установкой и иметь соответствующий сертификат и стандарт качества, в зависимости от необходимой надёжности устройства с учётом цены и возможности установки.

Для разработки предложенного прототипа устройства потребуется выбрать и установить контроллер и датчик, а также разработать корпус устройства.

Наметим несколько вариантов данных устройств, и выберем наиболее подходящие по критериям функционала, стоимости и сложности в эксплуатации.

#### 5.1.1 Выбор контроллера

Микроконтроллер — микросхема, предназначенная для управления электронными устройствами.

Типичный микроконтроллер сочетает на одном кристалле функции процессора и периферийных устройств, содержит оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) и (или) постоянно запоминающее устройство (ПЗУ). По сути, это однокристалльный компьютер, способный выполнять относительно простые задачи.

Использование в современном микроконтроллере достаточного мощного вычислительного устройства с широкими возможностями, построенного на одной микросхеме вместо целого набора, значительно снижает размеры, энергопотребление и стоимость построенных на его базе устройств.

В промышленности это чаще всего устройства промышленной автоматики — от программируемого реле и встраиваемых систем до ПЛК, систем управления станками

В то время как 8-разрядные микропроцессоры общего назначения полностью вытеснены более производительными моделями, 8-разрядные микроконтроллеры продолжают широко использоваться. Это объясняется тем,

					П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР	Лис
Изм.	Лис	№ докум.	Подпис	Дат		43

что существует большое количество применений, в которых не требуется высокая производительность, но важна низкая стоимость. В то же время, есть микроконтроллеры, обладающие большими вычислительными возможностями, например, цифровые сигнальные процессоры, применяющиеся для обработки большого потока данных в реальном времени (например, аудио-, видеопотоков).

Программирование микроконтроллеров чаще всего осуществляется при помощи языка C++. Помимо этого языка программирования реже используются Fort, Basic и различные интерпретаторы. Преимущество заключается в простоте использования данных языков, как наиболее простых как в логике, так и в синтаксисе. Некоторые контроллеры снабжаются средами программирования, распространяемыми вместе с контроллерами, например Arduino IDE.

Так же микроконтроллеры снабжены обилием портов для передачи сигнала, что практически сводит к нулю проблемы, связанные с передачей сигнала. Наиболее часто используемые интерфейсы: UART, I<sup>2</sup>C, SPI, CAN, USB, IEEE 1394, Ethernet;

Не лишены микроконтроллеры и одной важной функции: возможно присоединения дополнительных плат, наделяющих микроконтроллер дополнительным функционалом. Дополнительные платы помогают решить широкий спектр сложностей в применении, например подключение к локальной сети и интернету или геолокации.

Наметим следующие виды контроллеров и сравним по предложенным характеристикам: Arduino nano, ESP 8266, Raspberry Pi Zero, TEENSY.

Сведем в таблицу 19 краткие характеристики предложенных микроконтроллеров.

Таблица 19 – Краткие характеристики микроконтроллеров

	Arduino nano ATmega 328	ESP8266	Raspberry Pi Zero	TEENSY
--	-------------------------------	---------	----------------------	--------

Размер, см * см	1,85*4,2	1,7*2,4	6,5*3,0	1,7*3,5
Ураб, В	5	3,3	До 5	3,3; 5
Кол-во ВХОДОВ и ВЫХОДОВ	22	22	5	21
ОЗУ, Кб	2	2	512000	64
Флеш- память, Кб	32	4096	-	256

При сравнении характеристик был отброшен микроконтроллер Raspberry Pi Zero: самый мощный из выборки. Он является наиболее дорогим, и не имеющим в функционале возможности подключения к сети интернет, по требуемой для передачи сигнала от разрабатываемого устройства. Сравнительные характеристики оставшихся трёх микроконтроллеров, примерно, равны, однако из-за простоты, большого количество готовых библиотек и возможности установки дополнительных расширительных плат был выбран микроконтроллер Arduino nano ATmega 328[7], показанный на рисунке 16.

Минусами данного контроллера являются зависимость от электромагнитных помех (потребуется дополнительное экранирование при эксплуатации разрабатываемого прототипа) и незащищенность от влаги.

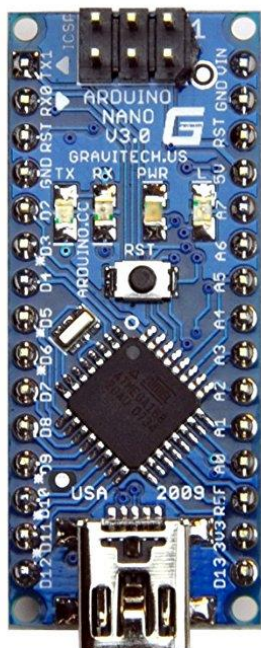


Рисунок 16. Микроконтроллер типа Arduino nano АТМega 328

### 5.1.2 Выбор датчика

Датчиком в данном случае будет являться инфракрасный термометр для удаленного измерения.

Наметим следующие модели основных датчиков для измерения температуры инфракрасным методом: Devantech TPA81 8x1Thermopile, Panasonic Grid-EYE, Melexis MLX90620[8], Melexis MLX90614[9].

Сравним характеристики предложенных термометров, и сведем данные в сравнительную таблицу 20.

Таблица 20 – Сравнительные характеристики ИК-термометров для удаленного измерения

	Devantech TPA81	Panasonic Grid-EYE	Melexis MLX90620	Melexis MLX90614
--	--------------------	-----------------------	---------------------	---------------------

	8x1Thermopile			
Диапазон рабочих температур, t °С	+4...+100	-20...+100	-20...+300	-70... +382.2
Погрешность, t °С	2	3	1.5	0.02
Дальность измерений, м	2	Нет точных данных	Нет точных данных	Нет точных данных
Размеры, см*см	4,3*2,1	12,6*9,0	6,0*4,2	6,1*3,2

Вышеперечисленные датчики являются основными датчиками, используемыми для бесконтактного измерения температуры. Все приведенные датчики по умолчанию экранированы от электромагнитных помех, что позволяет использовать их в различных электроустановках. Первые три датчика являются матричными, то есть в основе лежит матрица чувствительных к дальнему инфракрасному диапазону элементов, что позволяет снимать полноценную картину дальнего инфракрасного спектра без физического смещения самих датчиков, однако перед нами стоит задача измерения температуры в одной точке, поэтому оптимальным в данной ситуации является Melexis MLX90614. Относительно аналогов данный датчик имеет и наиболее широкий диапазон температур объекта измерения.

### 5.1.3 Разработка корпуса устройства

					П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР	Лис
Изм.	Лис	№ докум.	Подпис	Дат		47

Для прототипа корпус устройства будет произведен методом печати на 3D-принтере, соответственно выбор будет сделан между пластиками, используемыми при таком виде печати.

Для материала корпуса был выбран пластик типа ABS и пластик типа HIPS(ударопрочный полистерол).

ABS-пластик (акрилонитрилбутадиенстирол, химическая формула  $(C_8H_8)_x \cdot (C_4H_6)_y \cdot (C_3H_3N)_z$ ) — ударопрочная техническая термопластическая смола на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом (название пластика образовано из начальных букв наименований мономеров). Пропорции могут варьироваться в пределах: 15—35 % акрилонитрила, 5—30 % бутадиена и 40—60 % стирола.

Свойства:

- Непрозрачный (хотя есть и прозрачная модификация — MABS) материал желтоватого оттенка. Окрашивается в различные цвета.
- Нетоксичность в нормальных условиях.
- Долговечность в отсутствии прямых солнечных лучей и ультрафиолета.
- Стойкость к щелочам и моющим средствам.
- Влагостойкость.
- Маслостойкость.
- Кислотостойкость.
- Теплостойкость 103 °C (до 113 °C у модифицированных марок).
- Широкий диапазон эксплуатационных температур (от -40 °C до +90 °C).
- Растворяется в сложных эфирах, кетонах, 1,2-дихлорэтаноле, ацетоне, этилацетате.
- Плотность 1.02-1.06 г/см<sup>3</sup>

Свойства HIPS-пластика во многом схожи, но есть некоторые различия:

					П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР	Лис
Изм.	Лис	№ докум.	Подпис	Дат		48



- Материал не поглощает влагу, лучше переносит условия внешней среды, не подвержен разложению. Дольше хранится в открытом состоянии без упаковки.

- Мягкий, лучше поддается механической постобработке.

- Легкость и низкое водопоглощение позволяют при соблюдении определенных условий создать не тонущий в воде объект.

- Неокрашенный HIPS имеет ярко-белый цвет, что дает ему эстетические преимущества. Матовая фактура визуально сглаживает слои и шероховатости печати.

Из него производится пластиковая посуда. Еще более важно то обстоятельство, что он безвреден для людей и животных и является неканцерогенным.

Оба данных пластика позволяют выдерживать температуры до 180-200 °С и выдерживают воздействие солнечного излучения. Необходимо упомянуть, что для достижения необходимых характеристик корпуса из обоих видов пластиков, они нуждаются в закалке при температуре 110-140 °С и обработке ацетоном или D-лимоненом соответственно для устранения микротрещин и шероховатостей.

Использование ABS-пластика так же обуславливается отличными механическими свойствами, долговечностью и низкой стоимостью этого материала.

Однако применение пластика типа HIPS упрощается более низкой стоимостью и устойчивостью к влажности.

Выберем для разработки корпуса ударопрочный полистирол(HIPS-пластик).

#### 5.1.4 Разработка программного обеспечения(ПО)

Для обработки сигнала датчика, используемого в устройстве, была необходима разработка программного обеспечения. В рамках данной работы был разработан алгоритм работы на языке программирования C, обеспечивающий корректную работу разработанного устройства с

					П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР	Лис
Изм.	Лис	№ докум.	Подпис	Дат		49

возможностью подключения до 63 датчиков температуры, а также коррекцию ошибок передачи данных (до 20% потерь или искажений передаваемых пакетов данных). Также было разработано программное обеспечение оператора для ПК на языке программирования Python с отображением данных в режиме реального времени, позволяющее оперативно отслеживать состояние объекта и выполнять такие операции как автоматическое определение скорости нарастания температуры и заморозка показаний на экране. Код программного обеспечения изложен в Приложении А.

## 5.2 Принцип работы устройства непрерывного анализа состояния контакта

После выбора оборудования и обоснования опасности различных факторов, перейдем к разработке устройства непрерывного анализа состояния электрического контакта. Так как, ослабление контакта, его загрязнение, или повышение переходного сопротивления приводят к его нагреву, предлагается оценивать состояние контактного соединения при помощи инфракрасного термометра.

Конструкция устройства будет состоять из следующих частей: микропроцессор Arduino nano ATmega 328, инфракрасный термометр удалённого измерения Melexis MLX90614, корпус из HIPS-пластика, и теплопроводящая пластина.

Теплопроводящая пластина необходима для снижения влияния поверхности, с которой будет производиться измерение температуры: устройство может измерять температуры с различных поверхностей, и чтобы избежать сложностей с учётом материала, его теплопроводных свойств, и качества лакокрасочного покрытия, предлагается использовать именно пластину из металла с хорошими теплопроводными свойствами.

					<i>П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР</i>	<i>Лис</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпис</i>	<i>Дат</i>		<i>50</i>

На рисунке 17 представлена упрощенная схема устройства.

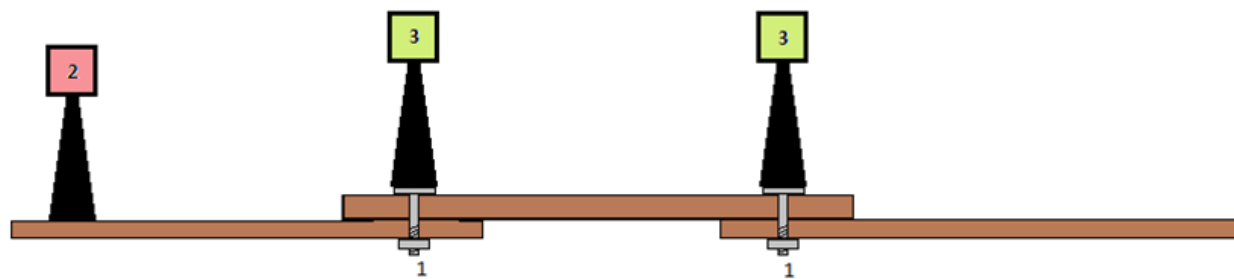


Рисунок 17. Упрощенная схема устройства

На рисунке 17 цифрами обозначены: 1 – болтовое контактное соединение шин, 2 – датчик коррекции, 3 – датчик анализа.

Датчики анализа точно, исходя из функционала термометра, измеряют температуру в заданных точках. При помощи микроконтроллера, показания термометра сравниваются с показаниям датчика коррекции, и при превышении критического значения разницы температур, можно сделать вывод об ощутимом ухудшении состояния электрического контакта. Так как функционал микроконтроллера типа Arduino весьма широк, возможна передача сигнала при помощи Wi-Fi модуля на частоте 5ГГц(стандарт связи IEEE 802.11.n) на АСДУ для информирования дежурного персонала об ухудшении состояния электрического контакта, и необходимости принятия мер по устранению возможной аварийной ситуации.

Опытный прототип не лишен недостатков. К недостаткам можно отнести:

- Слабая защищенность микроконтроллера к электромагнитным помехам.
- Шероховатость корпуса устройства, вызванная печатью на 3D-принтере.
- Слабая устойчивость к влаге.
- Необходимость учёта влияния освещенности естественным освещением.

### 5.3 Перспективы развития

Предложенное экспериментальное устройство, несмотря на отмеченные достоинства, имеет и недостатки, необходимые для рассмотрения при проектировании серийных промышленных образцов. При разработке необходимо учесть надежность данного устройства, увеличить степень защиты и уменьшить влияние электромагнитных помех. В случае успешного учёта всех параметров, разработанное устройство может быть допущено в эксплуатацию в электроустановках всех классов напряжения, что несомненно увеличит надёжность того или иного электрического аппарата, и поможет избежать опасных аварийных ситуаций, таких как возгорание или взрыв электрооборудования.

					<i>П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР</i>	<i>Лис</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпис</i>	<i>Дат</i>		52

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом выполнения выпускной научной работы является прототип предлагаемого устройства непрерывного анализа состояния электрического контакта. Было выбрано оборудование для прототипа, и подготовлено программное обеспечение. После рассмотрения технологий и порядков оценки состояния контактных соединений получена доказательная база о работоспособности предлагаемого метода. Эксперимент по нахождению зависимости так же доказывает состоятельность данной методики.

Несмотря на то, что на сегодняшний день прототип не соответствует требованиям для внедрения в промышленность, подтверждение методики очень важно для дальнейшей разработки. Возможность контролировать состояние контактных групп в режиме реального времени в дальнейшем позволит сделать важный шаг в развитии технологий диагностики электротехнического оборудования. Прогнозирование объемов и сроков ремонтных работ, и более детальные знания о контролируемом узле способствуют снижению затрат и издержек при эксплуатации.

					П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР	Лис
						53
Изм.	Лис	№ докум.	Подпис	Дат		

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. “Правила устройства электроустановок ПУЭ” издание седьмое, утв. Приказом Минэнерго России от 08.07.2002 № 204. – м: Изд-во НЦ ЭНАС, 2011. – 512 с.
2. “Справочник по проектированию электрических сетей под редакцией Д.Л. Файбисовича”, издание 4-е. – М: Изд-во НЦ ЭНАС, 2013. – 720с.
3. РД 153-34.0-20.363-99 «Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ»
4. РД 34.45-51.300-97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования»
5. Ragnar Holm “Electric contact handbook”/ Ragnar Holm //Springervertag Berlin Heldberg GmbH, 1958 – 522р.
6. А.В. Баталова Пирометрический контроль качества электрических контактных соединений /В.А. Захаренко, Д.Б.Пономарёв – Омск: изд-во ОГТУ, 2014 – 4с.
7. <http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardNano> - Каталогные данные Arduino Nano
8. <https://www.melexis.com/en/product/mlx90614/digital-plug-play-infrared-thermometer-to-can> - Каталогные данные ИК-термометра MLX 90614
9. <https://www.espressif.com/en/products/hardware/esp8266x/overview> - Характеристики контроллера ESP8266
10. ГОСТ 8024-90 «Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000В»

					П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР	Лис
Изм.	Лис	№ докум.	Подпис	Дат		54

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

```
#include <wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Adafruit_MLX90614.h>
Adafruit_MLX90614 mlx1 = Adafruit_MLX90614(0x5); //установили датчик температуры
Adafruit_MLX90614 mlx2 = Adafruit_MLX90614(0x6); //установили датчик температуры
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2); // Устанавливаем дисплей
void setup()
{
  lcd.init();//инициализируем дисплей
  lcd.backlight();// Включаем подсветку дисплея
  lcd.print("loading...");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("");
  delay(500);
  lcd.noBacklight();// Выключаем подсветку дисплея
  delay(500);
  lcd.backlight();// Включаем подсветку дисплея.
  // Serial.begin(9600);
  mlx1.begin();
  mlx2.begin();
}
void loop(){
  // Serial.println(mlx.readAmbientTemp());//можно прочитать температуру самого датчика, если подставить F вместо C, будет измерение в фаренгейтах
  lcd.setCursor(0, 0);
  // Serial.println(mlx.readObjectTemp());
  String temperature1="";
  String temperature2="";
  lcd.print("Temp:      ");//куча пробелов чтобы сбросить предыдущее
  lcd.setCursor(0, 1);
  temperature1 = String(mlx1.readObjectTemp(),1);
  temperature2 = String(mlx2.readObjectTemp(),1);
  lcd.print(temperature1+" "+temperature2);
  if (abs(mlx1.readObjectTemp()-mlx2.readObjectTemp())>10){
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("ATTENTION!!!");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("check contact!!!");
  };
  // Serial.println(temperature);
  delay(100);
}
```

					<i>П-282 13 04 02 2020 309 ПЗ ВКР</i>	<i>Лис</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпис</i>	<i>Дат</i>		<i>55</i>