

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
САЯНО-ШУШЕНСКИЙ ФИЛИАЛ

Кафедра «Гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических систем и электрических сетей»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 И. О. Пономаренко
подпись инициалы, фамилия
« 15 » 06 2018 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЧАСТЕЙ
ГИДРОАГРЕГАТА ГЭС**

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

13.04.02.06 Гидроэлектростанции

Научный руководитель 
подпись, дата

Ведущий инженер по наладке и испытаниям СМО филиала ПАО
«РусГидро» - «Саяно-Шушенская

К. А. Демшин
инициалы, фамилия

Выпускник 
подпись, дата

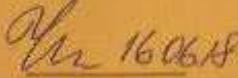
Инженер по наладке и испытаниям
2-й категории СМО филиала ПАО
«РусГидро» - «Саяно-Шушенская

О. С. Иванов
инициалы, фамилия

Рецензент 
подпись, дата

« 01.06.18 ГЭС имени П.С. Непорожнего»

М. А. Ананьев
инициалы, фамилия

Нормоконтролер 
подпись, дата

А. А. Чабанова
инициалы, фамилия

Саяногорск; Черемушки 2018

АННОТАЦИЯ

При работе агрегата могут возникать дефекты, связанные с повышением температуры его вращающихся частей. Это задевание вращающихся частей о неподвижные, наличие тел трения, неравномерный нагрев, который приводит к деформациям, быстрому износу и выходу из строя. Эти дефекты могут быть причиной повышения вибрации узлов гидроагрегата.

В магистерской диссертации рассматриваются вопросы по измерению температуры некоторых вращающихся частей гидроагрегата с помощью бесконтактных инфракрасных датчиков температуры. Были выбраны датчики, по которым была написана программа их работы. Разработана система сбора данных по температуре диска подпятника агрегата и указаны рекомендации по определению дефектов. Предложены места установки датчиков для контролирования температуры вращающихся частей.

АВТОРЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Применение инфракрасных датчиков для определения температуры вращающихся частей гидроагрегата ГЭС».

Цель работы:

Разработка системы сбора данных о температуре вращающихся частей гидроагрегата с помощью инфракрасных датчиков температуры. Построение графиков температуры объектов контроля и выдача рекомендаций по полученным данным.

Основные задачи:

Показать, что тепловое расширение тел в узлах гидроагрегата приводит к повышению вибрации.

Проанализировать особенности измерения температуры способами, применяемыми на ГЭС.

Доказать, что с помощью инфракрасных датчиков, удается определить повышение температуры намного быстрее, чем датчиками, которые используются сейчас.

Рассмотреть возможность использования инфракрасных датчиков для контроля вращающихся частей агрегата (поверхности вала в подшипниках, диск подпятника, ротор агрегата и другие).

Создать систему сбора данных температуры с использованием инфракрасных датчиков, с учетом вращения контролируемых поверхностей. Построить графики температуры. Указать рекомендации по определению дефектов.

Научная новизна:

Новизна заключается, в том что в данной работе рассматривается влияние нагрева в различных частях гидроагрегата на вибрацию. Для контролирования температуры рассматриваются инфракрасные датчики, которые способны для сбора информации быстрее, чем те методы, которые применяются на ГЭС. Разработана система сбора данных для датчиков и описано, как рассматривать полученные данные о температуре в виде рекомендаций.

Практическая значимость работы:

Результаты работы могут быть использованы при создании новой, усовершенствованной системы диагностики работы гидроагрегатов ГЭС.

Личный вклад автора:

Программирование работы системы сбора данных, инфракрасного датчика температуры. Указание рекомендаций при выявлении дефектов.

Апробация работы:

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1) IV Всероссийской научно – практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов «ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В XXI ВЕКЕ», Саяногорск р.п. Черемушки, 13 – 14 апреля 2017 года.

2) III (XVIII) Всероссийская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Молодая мысль – развитию энергетики», Братск, 23 – 27 апреля 2018 года.

3) V Всероссийской научно – практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов «ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В XXI ВЕКЕ», Саяногорск р.п. Черемушки, 26 – 27 апреля 2018 года.

Публикации:

По результатам работы опубликовано 3 статьи.

Структура и объём диссертации:

Диссертация состоит из введения, количества глав, заключения и списка литературы из н наименований. Материал изложен на 66 страницах, содержит 38 рисунка и 28 формул.

Ключевые слова: гидроагрегат, температура, инфракрасный датчик, подшипник, диск под пятника, тела трения, дефекты, пятно сканирования, разрешение датчика.

ABSTRACT

Graduation qualification work on the topic "Application of infrared sensors to determine the temperature of rotating parts of the hydroelectric power plant HPP."

Objective:

Development of a system for collecting data on the temperature of rotating parts of a hydroelectric unit using infrared temperature sensors. Constructing temperature charts of control objects and issuing recommendations on the data obtained.

Main goals:

Show that the thermal expansion of the bodies at the nodes of the hydroelectric unit leads to an increase in vibration.

Analyze the features of temperature measurement by the methods used at HPP.

Prove that using infrared sensors, it is possible to determine the temperature rise much faster than the sensors that are used now.

Consider the use of infrared sensors to monitor the rotating parts of the unit (shaft surfaces in bearings, thrust plate, rotor unit and others).

Create a system for collecting temperature data using infrared sensors, taking into account the rotation of the monitored surfaces. Construct temperature charts. Specify recommendations for identifying defects.

Scientific novelty:

The novelty lies in the fact that in this work the effect of heating in different parts of the hydroelectric unit on vibration is considered. To control temperature, infrared sensors are considered that are capable of collecting information faster than those used at HPPs. A system for data collection for sensors has been developed and described how to treat the obtained temperature data in the form of recommendations.

Practical significance of the work:

The results of the work can be used to create a new, improved system for diagnosing the operation of hydroelectric power stations of the hydroelectric power station.

Personal contribution of the author:

Programming the operation of a data acquisition system, an infrared temperature sensor. Indication of recommendations for defects.

Testing of work:

The results of the thesis were reported and discussed at the following conferences:

1) IV All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Specialists, Graduate Students and Students "HYDROELECTRIC POWER STATIONS IN THE XXI CENTURY", Sayanogorsk r.p. Cheryomushki, April 13 - 14, 2017.

2) III (XVIII) All-Russia scientific and technical conference of students and graduate students "Young thought - development of energy", Bratsk, April 23 - 27, 2018.

3) V All - Russian Scientific - Practical Conference of Young Scientists, Specialists, Graduate Students and Students "HYDROELECTRIC POWER STATIONS IN THE XXI CENTURY", Sayanogorsk. Cheryomushki, on April 26 - 27, 2018.

Publications:

Based on the results of the work, 3 articles have been published.

Structure and scope of the dissertation:

The thesis consists of an introduction, a number of chapters, a conclusion and a list of literature from n titles. The material is presented on 66 pages, contains 38 figures and 28 formulas.

Key words: hydrounit, temperature, infrared sensor, bearing, thrust plate, friction bodies, defects, spot of scanning, sensor resolution.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	9
1 Общие сведения о проблемах повышения температуры основных узлов гидроагрегата	10
1.1 Силы, возникающие в гидроагрегате	10
1.2 Температурные расширения на поверхностях элементов трения	10
1.3 Постановка задачи	11
1.4 Влияние геометрии основных узлов на тепловое и вибрационное состояние гидроагрегата.....	11
1.5 Подпятник.....	12
1.5.1 Ступица подпятника	12
1.5.2 Трение втулки об уплотнение подпятника	13
1.6 Обзор дефектов связанных с повышением температуры узлов.....	15
1.6.1 Понижение уровня масла в ванне подпятника ниже поверхности трения	15
1.6.2 Защемление сегментов в упорах и затруднение их самоустанавливаемости.....	15
1.6.3 Частичное повреждение поверхности сегмента	16
1.6.4 Разрушение опорных тарелок и болтов подпятника.....	17
1.6.5 Нагрев уплотнения подпятника.....	18
1.6.6 Генераторный и турбинный подшипник	18
1.6.7 Уплотнение генераторного подшипника	19
1.6.8 Ротор генератора.....	19
1.6.9 Контактные кольца щеточного аппарата	19
1.6.10 Прекращение подачи смазки	20
1.6.11 Механический дефект в подшипниках	20
1.7 Вывод.....	20
2 Выбор средств, измерения температуры вращающихся частей гидроагрегата	21
2.1 Инфракрасное излучение предметов	21
2.2 Средства для измерения инфракрасного излучения предметов	21
2.3 Показатель визирования пирометра.....	22
2.4 Применяемые средства контроля и мониторинга температуры	23
2.4.1 Стационарная система теплового контроля.....	23
2.4.2 Температурный контроль подпятников	24
2.4.3 Переносная система теплового контроля.....	25
2.5 Решение проблемы измерения температуры вращающихся частей	26
2.6 Вывод.....	27
3 Моделирование работы датчиков и системы контроля температуры вращающихся частей и зон нагрева	29
3.1 Пятно сканирования датчика	29
3.2 Расчет пятна сканирования на поверхности диска подпятника.....	31
3.3 Расположение датчиков для контроля вращающихся частей	35

3.3.1 Ротор гидроагрегата.....	35
3.3.2 Подпятник гидроагрегата.....	36
3.5 Описание программируемой системы	38
3.6 Алгоритм работы системы сбора данных	46
3.7 Методика диагностики причин повышения температуры	51
3.7.1 Применение алгоритма работы системы сбора данных по трем датчикам в подпятнике.....	51
3.8 Вывод.....	56
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	57
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	58
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	59
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Код программы	61
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Код программы.....	64
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Места установки ИК датчиков	66

ВВЕДЕНИЕ

Надежность эксплуатации гидроагрегатов гидроэлектрических станций определяется рядом факторов. Одним из таких факторов является характер и величина вибрации агрегата в целом и отдельных его узлов. Вибрация характеризует состояние агрегата после его пуска в эксплуатацию. По характеру и величине вибрации могут быть выявлены некоторые неисправности в агрегате такие как: ухудшение работы подшипников, постепенное развитие трещин в материале, быстрый износ уплотнений вала турбины, а также предаварийное его состояние [1, с. 3].

Исследование вибрационных характеристик действующих гидроагрегатов является всегда актуальным, так как направлено на повышение технического уровня оборудования и предупреждение аварийных ситуаций. Проблемой современной энергетики является также создание эффективного контроля вибрационного состояния гидроагрегатов, находящихся в эксплуатации. Наиболее прогрессивным решением здесь является внедрение на ГЭС систем технической диагностики гидроагрегатов, которые позволяют выявлять дефекты и неисправности оборудования на ранней стадии их развития [1, с. 4]. К их числу можно отнести системы контроля вибрации, контроль температуры узлов и тепловизионный контроль. В настоящей работе рассматривается применение инфракрасных датчиков температуры для контроля вращающихся частей агрегата.

1 Общие сведения о проблемах повышения температуры основных узлов гидроагрегата

1.1 Силы, возникающие в гидроагрегате

Силы, возникающие в гидроагрегате и действующие на отдельные элементы конструкции агрегата, могут быть как постоянными (статическими), так и переменными (динамическими) во времени. Действие этих сил проявляется в виде деформации отдельных элементов агрегата, их вибрации, а также вибрации агрегата в целом. Характер проявления сил различен для разных режимов работы агрегата. Режимы работы агрегата можно разделить на установившиеся и неустановившиеся (переходные процессы) [1, с. 5].

В ряде случаев повышенная вибрация агрегата приводит к ослаблению болтов и клиньев, крепящих направляющие подшипники, ослаблению крепления крестовин генератора, а также к быстрому износу направляющих подшипников. Увеличение абсолютной вибрации агрегата и бой вала (относительные виброперемещения) приводят к дополнительной динамической нагрузке на направляющие подшипники, а следовательно, к повышению их температуры и повышению механических потерь в агрегате. Большая вибрация агрегата способствует также ухудшению работы лабиринтных и сальниковых уплотнений вала турбины. Многочисленные случаи поломок и повреждений деталей гидроагрегатов являлись следствием повышенной вибрации [1, с. 21].

Опыт эксплуатации показывает, что со временем вибрация агрегата увеличивается. Это связано, с постепенным износом направляющих подшипников агрегата, ослаблением крепления отдельных узлов (домкраты статора генератора, крепление крестовин, вкладышей подшипников) [1, с. 148].

Наблюдение за состоянием агрегата в отношении вибрации позволяет эксплуатационному персоналу вовремя обнаружить неполадки с агрегатом, а предлагаемый подход к измерениям поможет выявить дефект в узлах трения гидроагрегата без проведения длительных и дорогостоящих испытаний и ремонтов [1, с. 143].

1.2 Температурные расширения на поверхностях элементов трения

Динамические силы возникают в гидроагрегате в результате:

- 1) небаланса ротора агрегата;
- 2) дефектов центровки;
- 3) внутреннего трения в материале вала;
- 4) наличия трения в подшипниках с зазором или задевания вращающихся частей о неподвижные;
- 5) геометрией основных узлов гидроагрегата.

Многие из данных явлений уже хорошо описаны [1-3], поэтому в работе будет рассмотрено влияние геометрии основных узлов и влияние зон нагрева в процессе работы на вибрационное состояние гидроагрегата [1, с. 33].

1.3 Постановка задачи

1. Проанализировать особенности измерения температуры теми способами, которые применяются на ГЭС.
2. Показать, что тепловое расширение тел в узлах приводит к повышению вибрации узлов агрегата.
3. Доказать, что с помощью ИК датчиков, удается определить намного быстрее повышение температуры, чем стационарными датчиками.
4. Рассмотреть возможность использования ИК датчиков на вращающихся частях агрегата (подшипники, диск подпятника, ротор агрегата и другие).
5. Создать метод расчета температуры с помощью ИК датчика, с учетом высокой скорости вращения агрегата. Построить распределение температуры по поверхности вращающихся тел.
6. Предложить алгоритмы защиты гидроагрегата от нагрева поверхностей вращающихся тел

1.4 Влияние геометрии основных узлов на тепловое и вибрационное состояние гидроагрегата

В ряде случаев неправильная сборка гидроагрегата или неквалифицированный ремонт его, может привести к отклонениям в геометрии, например в оси вала и оси вращения, рисунок 1. Вибрация в этом случае приводит к повышенному износу сегментов и росту трения в узлах и даже к повреждениям подшипников. На примере рассмотрим данное явление на опорном подшипнике гидроагрегата, подпятнике.

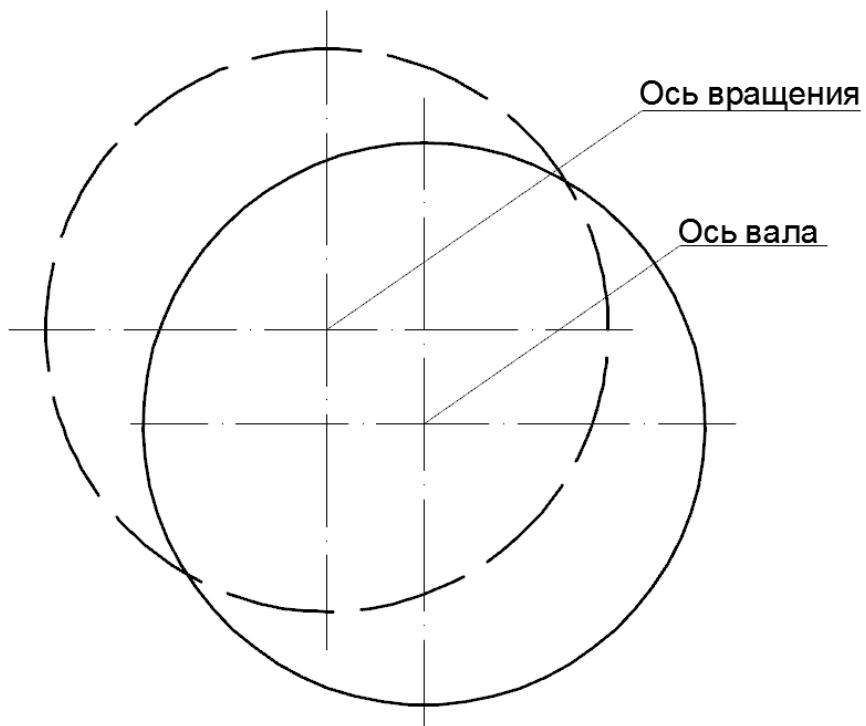


Рисунок 1- Нарушение геометрии оси вала и оси вращения

Ось вала надставки не совпадает с осью вращения генераторного или турбинного подшипника. В результате возникает односторонний нагрев участка, что является причиной искривления поверхности, повышению боя вала и вибрации [2, с. 144], рисунок 2.

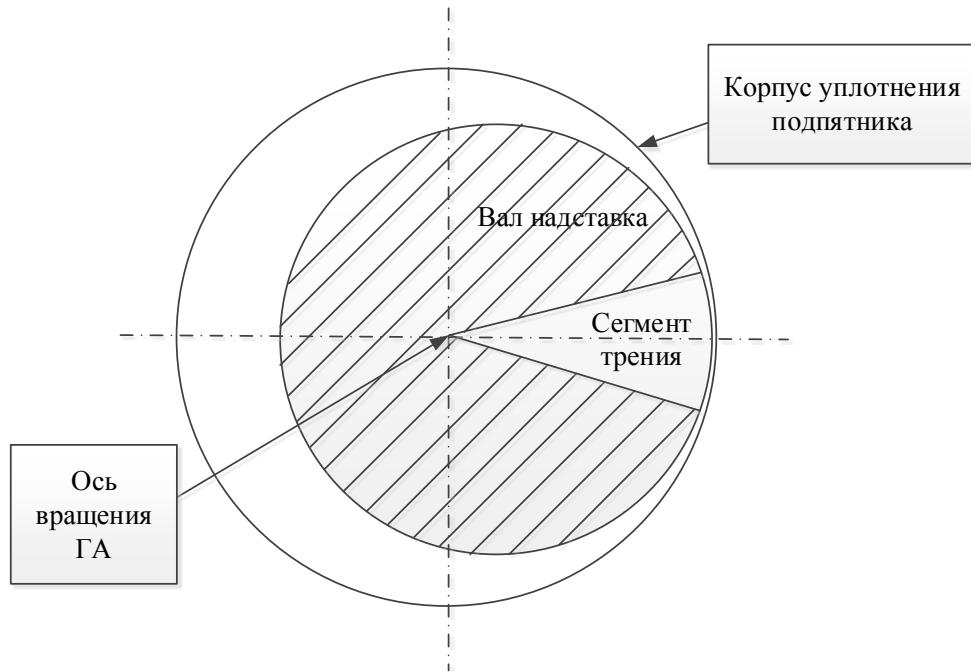


Рисунок 2 – Односторонний нагрев участка

Перейдем к подпятнику, как наиболее сложному узлу агрегата.

1.5 Подпятник

1.5.1 Ступица подпятника

Сила трения, возникающая в подшипниках, приводит к повышенному нагреву элементов и падению КПД.

Ступица подпятника является основной силовой его частью, к которой крепится зеркальный диск и через ступицу вся нагрузка от веса ротора и реакции воды передается на сегменты, рисунок 3. Ступица должна обеспечить надежную и весьма жесткую опору для диска, а ее торцевая поверхность должна оставаться плоской и перпендикулярной оси вала агрегата, чтобы не вызывать биения зеркальной поверхности диска и вертикальной вибрации опорных элементов гидроагрегата.

При изготовлении и обработке ступицы и диска на заводе их поверхности выполняются как по классу чистоты, так и по отклонению от плоскостности в пределах допусков. Обе плоскости диска и плоскость ступицы, сопрягаемая с диском, выполняются с отклонением от плоскости не более 0,03 мм. Однако при горячей посадке ступицы на вал с натягом во время монтажа происходит деформация втулки, причем наиболее сильно искривляется поверхность, сопрягаемая с диском [2, с. 160].

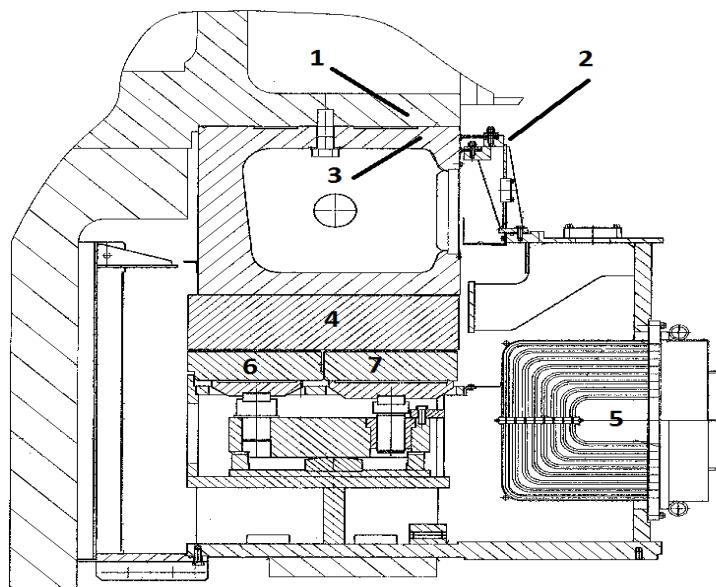


Рисунок 3- Подпятник гидроагрегата:

1 – остав ротора; 2 – корпус уплотнения ПП; 3 – втулка подпятника;
4 – диск подпятника; 5 - маслоохладитель; 6 – внутренний сегмент ПП;
7 – наружный сегмент ПП

Неровности, появившиеся на плоскости ступицы, передаются на зеркальную поверхность диска, вызывают ее искривление и биение диска при работе. В отдельных случаях в процессе эксплуатации подпятника появляются деформации ступицы или диска, вызванные различными напряжениями, что также приводит к увеличению биения зеркальной поверхности диска при работе. Повышенная неровность зеркальной поверхности диска приводит к утяжелению условий работы подпятника и частым его повреждениям (трещинообразование оснований и узлов ПП, износ сегментов) [2, с. 167].

Проведенные натурные исследования показали, что температурная деформация является одной из главных причин, серьезно затрудняющих работу подпятников, имеющих крупные однослойные сегменты [2, с. 96].

1.5.2 Трение втулки об уплотнение подпятника

При вращении втулки подпятника и трение его об уплотнение, происходит неравномерный нагрев кого-то сегмента втулки, рисунок 4. В результате неравномерного нагрева втулки подпятника (а вместе с ней и остава ротора), происходит линейное температурное расширение, что приводит к деформации. В результате чего искривляется поверхность диска пяты и наблюдается рост боя диска подпятника и абсолютной вибрации опорных узлов. Подобное явление было зафиксировано на одном из агрегатов Саяно-Шушенской ГЭС [3, с. 119].

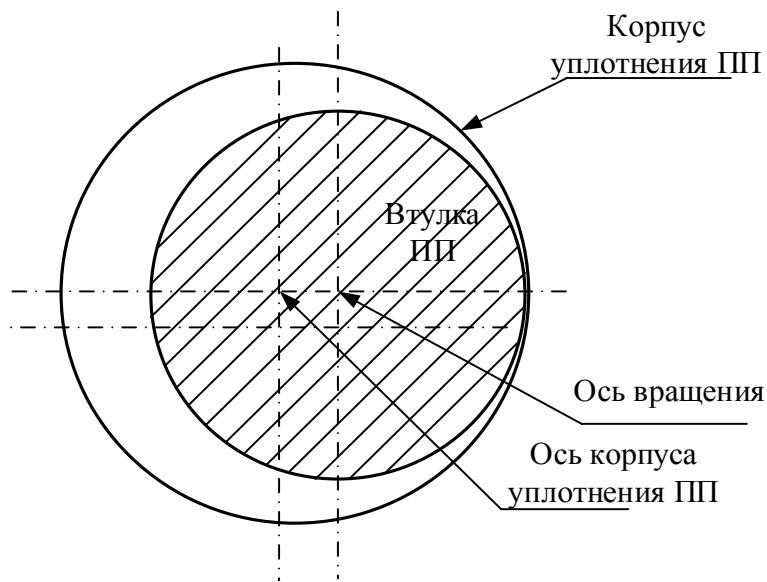


Рисунок 4 - Несоосность корпуса уплотнения

Поле распределение температуры по поверхности втулки подпятника повторяет неровность поверхности диска подпятника, рисунок 5.

До нагрева втулки подпятника бой диска ПП агрегата был небольшим, но когда произошел не равномерный нагрев и образовались места трения, бой диска ПП увеличился. После останова гидроагрегата бой диска ПП не уменьшился до исходного значения, из чего можно сделать вывод, что нагрев некоторых частей агрегата приводит к остаточным деформациям и повышению вибрации агрегата. Последующие неоднократные нагревы узлов с последующей их деформации приводят к повышенной вибрации и износа узла [1, с. 30].

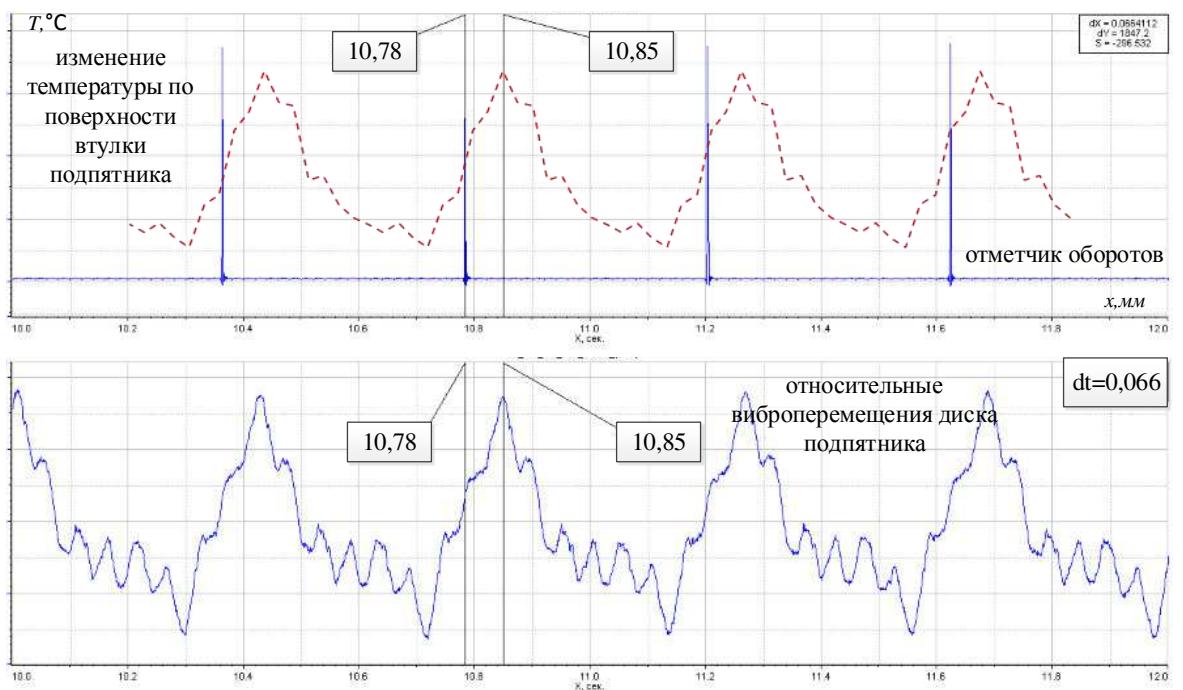


Рисунок 5- Зависимость распределения температуры по ступице подпятника и относительных виброперемещений диска пяты

1.6 Обзор дефектов связанных с повышением температуры узлов

1.6.1 Понижение уровня масла в ванне подпятника ниже поверхности трения

К грубым ошибкам эксплуатационного персонала, приводящим к серьёзным повреждениям подпятника, относится понижение уровня масла ниже поверхности трения при работе агрегата. Повреждения в таких случаях развиваются очень быстро и приводят к чрезвычайно серьезным повреждениям подпятника: полный снос фторопластового покрытия, оплавление бронзовой проволоки, повреждение зеркальной поверхности диска и его деформация [4, с. 8].

1.6.2 Защемление сегментов в упорах и затруднение их самоустанавливаемости

Ряд наблюдавшихся повреждений ЭМП-сегментов был вызван защемлением сегментов в упорах из-за их неправильной установки во время ремонта, из-за смешения сегментов при подъёме ротора на тормозах или во время подъёма ротора при сбросах нагрузки. В этих случаях повреждается рабочая поверхность одного или нескольких сегментов, которые были защемлены [4, с. 8].

Характерным примером такого повреждения является повреждение одного из сегментов в подпятнике, который был защемлен в упорах при монтаже ЭМП-сегментов. Сегмент потерял возможность самоустанавливаться. Вследствие отсутствия масляного клина началось усиленное истирание фторопласта в условиях недостаточной смазки, сопровождавшееся интенсивным тепловыделением. Повышение температуры этого сегмента было отмечено по показаниям станционного термоконтроля. Через 30 мин работы агрегата, когда температура этого сегмента стала на 20 °С выше температуры остальных сегментов, агрегат был остановлен и осмотрен подпятник. Обнаружено истирание фторопласта на этом сегменте до выхода бронзы на поверхность. Остальные сегменты целы [4, с. 8].

В других аналогичных случаях при потере самоустанавливаемости сегментов повреждения отмечались не сразу, особенно если они начинались у внутреннего диаметра сегмента на значительном расстоянии от места установки датчика термоконтроля или если в повреждённом сегменте не было термоконтроля. Размер повреждений при этом значительно больше и повреждёнными оказываются все сегменты подпятника. В этом случае повреждение развивается следующим образом. Происходит защемление сегмента, и из-за плохой самоустанавливаемости начинается истирание фторопластовой поверхности этого сегмента, обычно у его внутреннего или наружного края. Истирание происходит с разной скоростью в различных случаях (в зависимости от степени защемления сегмента) и постепенно приводит к выходу бронзы на поверхность трения. Если при этом повышения

температуры по станционному термоконтролю не отмечено и никаких мер не принято, то начинается постепенное повреждение бронзой зеркальной поверхности диска. Затем уже испорченной зеркальной поверхностью диска повреждается фторопластовая поверхность остальных сегментов. Как правило, при этом отмечается повышение температуры сегментов и агрегат останавливается персоналом или защитой. Типовая картина повреждения подпятника в этом случае следующая: значительно повреждены (до выхода бронзы на поверхность) один или несколько сегментов; остальные сегменты имеют частичный износ фторопласта в той же зоне, что и сильно повреждённые сегменты; над повреждённой зоной сегментов ухудшено состояние зеркальной поверхности диска [4, с. 9].

1.6.3 Частичное повреждение поверхности сегмента

Частичное повреждение фторопластовой поверхности сегмента может быть и не замечено при работе агрегата по показаниям термоконтроля, а обнаружено только при плановой ревизии или ремонте. Чаще всего такие повреждения бывают у внутреннего края сегмента и датчики температуры, расположенные ближе к наружному краю сегмента, на них не реагируют. Так, например, во время планового ремонта агрегата был обнаружен повреждённый сегмент подпятника. Поверхность фторопласта шириной около 150 мм у внутреннего края одного сегмента была стёрта до бронзы. При тщательном осмотре сегмента на нижней поверхности стального основания у одного из углов внутреннего края была обнаружена полоса натирания металла до блеска и наклёпа. Это свидетельствовало о заедании сегмента, его защемлении, что не давало ему свободно поворачивания и мешало образованию масляного клина. При более длительной работе с повреждённым сегментом могло произойти повреждение зеркала и других сегментов, а так же дойти до аварийных размеров. Подобное повреждение было обнаружено при плановой ревизии в двухрядном подпятнике. Повреждённым оказался один из наружных сегментов. Фторопласт на нём был стёрт до просвечивания бронзы у внешней стороны сегмента. На этом сегменте не был термоконтроля [4, с. 9].

В отдельных случаях агрегат может длительно работать с поврежденными сегментами, что объясняется медленным развитием повреждения и несовершенством или отсутствия термоконтроля. На двухрядном подпятнике были повреждены 6 из 24 сегментов внутреннего ряда. Повреждение было обнаружено через 4 месяца после проведения капитального ремонта. По суточным записям обнаружили повышение температуры сегментов на 5 - 6 °С. Все 4 месяца после ремонта агрегат работал без остановок. В конце ремонта при испытаниях системы регулирования агрегат дважды приводился к угонным оборотам (167 % от номинальных). При повышенных оборотах у агрегата с поворотно-лопастной гидротурбиной появляется гидравлическое усилие, действующее вверх, и происходит подъём ротора. При этом было возможно смещение части внутренних сегментов, а при опускании ротора они

оказались не на своём месте и потеряли свободу качания и нормального образования масляного клина. Это и могло послужить причиной повреждения. При осмотре было обнаружено, что на 6 сегментах у внутреннего края стёрт фторопласт до бронзы полосой примерно 100 мм. На остальных сегментах внутреннего ряда обнаружены натиры и глубокие риски полосой такой же ширины. Зеркальная поверхность диска повреждена над зоной повреждения сегментов. На нём образовался твёрдый налёт. В данном случае повреждение развивалось медленно, видимо, потому, что агрегат всё время находился в работе (не было остановов и пусков), и не было своевременно замечено из-за несовершенства термоконтроля (датчики термоконтроля расположены у наружной части сегментов, а повреждение развивалось у внутреннего края сегментов). Агрегат достаточно долго работал с повреждёнными сегментами, чем и объясняется большой объём повреждений подпятника, приведший к большим восстановительным работам и замене всех 24 внутренних сегментов [4, с. 9].

1.6.4 Разрушение опорных тарелок и болтов подпятника

В подпятниках с ЭМП – сегментами эластичное металлофторопластовое покрытие выдерживает чрезвычайно высокие нагрузки, как переменные, так и постоянные не повреждаясь. В результате оказываются перегруженными или подверженными высоким пульсациям опорные тарелки, опорные болты и другие элементы подпятника, что приводит к их повреждению. Характерным примером такого повреждения является разрушение подпятника на жестко винтовых опорах. Из-за местных разрушений прокладки, наклеенной на тыльную сторону диска, резко увеличилось биение зеркальной поверхности диска. От повышенных пульсаций стали разрушаться опорные тарелки и втулки опорных болтов. Ротор упал на тормозные колодки. Сигнализация и защита от такого рода нарушений не предусмотрена. Агрегат был остановлен вручную после появления стуков, ударов и дыма в зоне генератора. Объём повреждений в подпятнике и на агрегате был очень велик и потребовал больших восстановительных работ. Анализ температурных записей показал, что за 5 дней до аварии температура подпятника была на обычном уровне: сегментов 33 – 38 °C, а масла 28 °C. За 3 дня до аварии температура трёх ЭМП-сегментов понизилась до температуры масла, что свидетельствовало о полной разгрузке этих сегментов, т.е. о разрушении опорных элементов этих сегментов. Это был единственный признак начавшегося повреждения, на который эксплуатационный персонал не обратил внимания [4, с. 10].

Осмотр показал, что в подпятнике разрушились 16 втулок опорных болтов и 12 опорных тарелок из 16. Характер разрушения усталостный. Проверка волнистости зеркальной поверхности диска показала, что она составляет 0,9 мм при норме 0,08 мм. Характерным является то, что рабочая поверхность сегментов не повредилась. Лишь на двух сегментах было отмечено местное истирание фторопласта на 0,2-0,3 мм. Рассмотренное повреждение подпятника показало недостаточность контроля за работой подпятника. Чтобы

избежать повреждений опорных элементов под пятника, приводящих к тяжёлым разрушениям в агрегате, было рекомендовано следить как за повышением температуры сегментов, так и за понижением температуры [4, с. 11].

1.6.5 Нагрев уплотнения под пятника

При осуществлении контроля следует проверять состояние уплотнения между ступицей под пятника и корпусом маслованны, обеспечивающего защиту гидрогенератора от замасливания протечками и парами масла: уплотнительные элементы (резина, войлок, кожа) не должны иметь задиров, обеспечивать плотный контакт со ступицей, при этом уплотнение должно работать, не вызывая местный перегрев зоны контакта.

В случае нагрева в зоне контакта уплотнения и ступицы гидрогенератора, происходит изнашивание уплотнения, потеря герметичности и подсос паров масла [2, с. 14].

Гидроагрегат мощностью 180 МВт;

Турбина радиально-осевого типа, диаметр рабочего колеса 3,6 м;

Максимальный напор 208,5 м.

Частота вращения 250 об/мин.

После монтажа агрегата, через непродолжительное время после пуска, может возникнуть увеличенный бой вала турбины. Причиной этого является трение о вал турбины не обработанного должным образом уплотнения.

Повышенный бой удалось устранить путем приработки уплотнений или их частичного демонтажа. Но в результате неравномерного нагрева в теле вращающихся частей остались остаточные деформации, которые является причиной неровностей поверхности и следствие этому повышенному износу и увеличенными нагрузками на опорные узлы гидроагрегата[3, с. 118].

1.6.6 Генераторный и турбинный подшипник

Гидроагрегат мощностью 320 МВт;

Турбина радиально-осевого типа;

Расчетный напор 145 м;

Генератор зонтичного типа.

При эксплуатации сегментов под пятника с ЭПМ покрытием, необходимо контролировать температурный режим подшипниковых узлов гидроагрегата, обращая внимание, как на повышение температуры, так и на её понижение.

При уменьшении температуры отдельных сегментов под пятника до температуры масла в ванне, четко указывает на потерю соприкосновения сегмента с зеркалом пятнышка вследствие разрушения его опоры (тарелки). Опора может быть разрушена полностью или частично с образованием трещин [3, с. 210].

С развитием технологий в промышленности стали использоваться новые материалы. Покрытие под пятника и генераторного подшипника сменилось с баббитового на фторопластовое. Фторопластовое покрытие увеличило

надежность работы, особенно во время пуска и останова подпятника. Но в генераторном подшипнике ухудшилась система теплового контроля, так как температура сегментов стала дольше определяться датчиками. Увеличилось время определение температуры при её изменении.

1.6.7 Уплотнение генераторного подшипника

Гидроагрегат мощностью 211 МВт;

Турбина радиально-осевого типа;

Максимальный напор 208,5 м;

Генератор зонтичного типа, сегменты на жестких опорах;

Частота вращения 138,4 об/мин.

При использовании уплотнения ванн подшипников и подпятников, которые выполнено в металлическом варианте лабиринтового типа, требуется высокая точность при их изготовлении и при выполнении монтажных работ.

В случае пренебрежениями этими требованиями, может произойти касание неподвижных и подвижных лабиринтов, которое приведет к нагреву и деформации крышки подпятника. Из ванны вылилось масло и из-за этого сгорели баббитовые сегменты подпятника и нижнего генераторного подшипника. Простой гидроагрегата может занять продолжительное время [3, с. 137].

1.6.8 Ротор генератора

Оценку состояния сердечника производят по результатам измерения нагрева за время испытания и по величине удельных потерь.

Определённые с помощью приборов инфракрасной техники или/и термопар наибольшее повышение температуры не должно превышать 25°C и наибольшая разность нагревов различных зубцов должна быть не более 15°C [5, с. 47].

Ротор генератора не полностью охвачен датчиками. Так, повышения температуры обмотки возбуждения может свидетельствовать о наличие межвиткового короткого замыкания или о плохом охлаждении.

1.6.9 Контактные кольца щеточного аппарата

При работе гидроагрегата под нагрузкой, неожиданно произошло аварийное отключение гидроагрегата от защиты короткое замыкание (КЗ) в цепях ротора гидрогенератора. Осмотр показал, что выгорела шина токоподвода ротора гидрогенератора в месте присоединения к верхнему контактному кольцу щеточного аппарата. Причиной такой аварии могло стать некачественный монтаж токоподвода ротора гидрогенератора в месте присоединения к контактному кольцу. Отсутствие фиксации крепежа могло привести к нарушению плотности присоединения, возникновению электрической дуги и последующей аварии [6, с. 25].

1.6.10 Прекращение подачи смазки

На щите управления гидроагрегатом засветилась аварийная сигнализация, а ротор гидроагрегата продолжает вращаться. Дежурный понял, что ситуация аварийная и перевел регулятор скорости на ручной режим и остановил агрегат.

Причина аварии заключалась в том, что рабочий насос закачки масла отключился, а резервный насос из-за неисправности автоматики не включился. В результате отсутствия подачи масла для смазки подшипников начали оплавляться баббитовые сегменты подшипников, а также повредились шейки подшипников вала гидрогенератора. Для ремонта пришлось разобрать гидроагрегат до такой степени, чтобы можно было демонтировать вал гидрогенератора и выполнить в заводских условиях восстановительные ремонты шеек вала гидрогенератора [7, с. 49].

1.6.11 Механический дефект в подшипниках

Гидроагрегат работал на холостом ходу. Через некоторое время, появился предупредительный сигнал от термосигнализаторов, которые установлены в сегментах генераторного подшипника. Гидроагрегат остановили, вскрыли ванну подшипника и обнаружили один болт специального монтажного приспособления для установки зазоров между сегментом и шейкой вала подшипника. Болт был вкручен, сегмент подшипника одной стороной был прижат к валу. Это привело к подплавлению баббита одного сегмента, а затем к подплавлению баббита на других сегментах [7, с. 49].

Так же подплавление сегментов может быть в случае поломки сегментов. Оторвавшийся болт сегмента в процессе эксплуатации подшипников, может налипнуть на сегмент, что приведет к повреждению сегмента, а в под пятнике ещё и к повреждению зеркала диска [7, с. 50].

1.7 Вывод

Проблема определения температуры вращающихся частей гидроагрегата является актуальной задачей. Так как увеличение температуры таких частей, свидетельствует о неисправности. Если во время не определить увеличение температуры вращающихся частей и не предпринять меры, то это приведет к большим повреждениям. В ряде случаев отмечено, что нагрев некоторых частей агрегата приводит к остаточным деформациям, искривлению рабочей поверхности (диск под пятника) и повышению вибрации агрегата.

Такой параметр, как распределение температуры по поверхности элементов трения является актуальной задачей, которую будем рассматривать в дальнейшем. А так же необходимость выбора средств, для определения температуры вращающихся частей и разработки методики по измерению температуры в элементах трения для контроля и мониторинга состояния гидроагрегата.

2 Выбор средств, измерения температуры вращающихся частей гидроагрегата

2.1 Инфракрасное излучение предметов

Любой предмет с температурой выше абсолютного нуля (T) излучает инфракрасное излучение в зависимости от его температуры. Это называется характеристикой излучения. Причиной этого является внутреннее механическое движение молекул. Интенсивность этого движения зависит от температуры объекта. Поскольку движение молекул заряда, создают электромагнитное излучение (фотонных частицы). Эти фотоны двигаться со скоростью света и ведут себя согласно оптическим принципам. Спектр этого излучения колеблется от 0,7 до 1000 мкм длины волны. По этой причине это излучение обычно не может рассматриваться невооруженным глазом. Эта область находится в красной области видимого света и поэтому названа «инфра»-красной [8, с. 185].

2.2 Средства для измерения инфракрасного излучения предметов

Пирометр — прибор для бесконтактного измерения температуры тел.

Принцип действия инфракрасного пирометра основан на измерении абсолютного значения излучаемой энергии одной волны в инфракрасном спектре. На сегодня это относительно недорогой бесконтактный метод измерения температуры. Данные устройства могут наводиться на объект с любой дистанции и ограничены лишь диаметром измеряемого пятна и прозрачностью окружающей среды. Интенсивность и спектр излучения зависит от температуры тела. Измеряя характеристики излучения тела, пирометр косвенно определяет температуру его поверхности [9].

Пирометры применяются для:

1. измерение температуры удаленных и труднодоступных объектов;
2. измерение температуры движущихся частей;
3. обследование частей, находящихся под напряжением;
4. контроль высокотемпературных процессов;
5. регистрация быстро изменяющихся температур;
6. измерение температуры тонкого поверхностного слоя;
7. обследование частей, не допускающих прикосновения;
8. обследование материалов с низкой теплопроводностью или теплоемкостью;
9. экспресс – измерения [9].

На рисунке 6 представлено измерение температуры твердого тела с помощью пирометра.

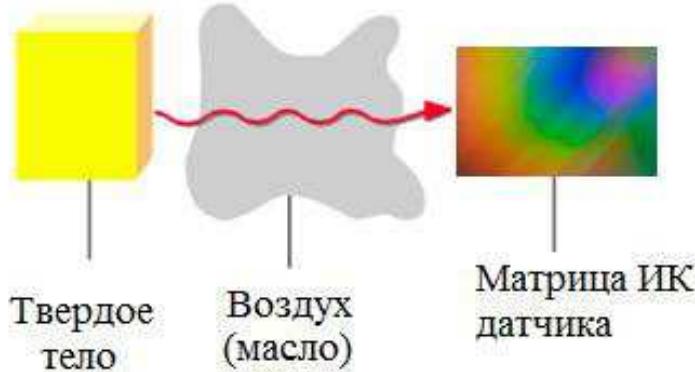


Рисунок 6 - Измерение температуры твердого тела

На матрицу инфракрасного датчика, через воздух (масло) происходит излучение (поток фотонов) твердого тела.

Самыми важными характеристиками пирометра, определяющими точность измерения температуры, являются оптическое разрешение и настройка степени черноты объекта. Тело называется черным, если оно при любой температуре полностью поглощает всю энергию падающих на него электромагнитных волн независимо от их частоты и направления распространения. Следовательно, коэффициент поглощения черного тела тождественно равен единице [8, с. 189].

Коэффициент эмиссии ϵ (коэффициент излучения, степень черноты) – способность материала отражать падающее излучение. Данный показатель важен при измерении температуры поверхности с помощью инфракрасного термометра (пирометра). Этот показатель определяется как отношение энергии, излучаемой данной поверхностью при определенной температуре к энергии излучения абсолютно чёрного тела при той же температуре. Он может принимать значения от 0 до 1. Применение неверного коэффициента эмиссии — один из основных источников возникновения погрешности измерений для всех пирометрических методов измерения температуры [8, с. 190].

2.3 Показатель визирования пирометра

Показатель визирования пирометра - это отношение расстояния до объекта к размеру измеряемого участка его поверхности.

В технической документации на прибор указывается значение показателя визирования или приводится диаграмма поля зрения.

Минимальный измеряемый диаметр - наименьший диаметр объекта, который может быть измерен при данном фокусном расстоянии и размере приемника. При увеличении или уменьшении расстояния измеряемый диаметр возрастает. При приближении к объекту вплотную измеряемый диаметр увеличивается до размеров входного зрачка прибора. Точность измерения не зависит от расстояния до тех пор, пока размер объекта

больше измеряемого диаметра. Индицируемая пиromетром температура будет не верна, если размер объекта меньше диаметра пятна контроля. Так как объект, температура которого должна быть измерена, не заполняет весь диаметр пятна контроля, прибор принимает излучение от других объектов окружающей среды, которое оказывает влияние на точность измерения [10].

На рисунке 7 приведены примеры расположения пятна визирования относительно объекта измерения.

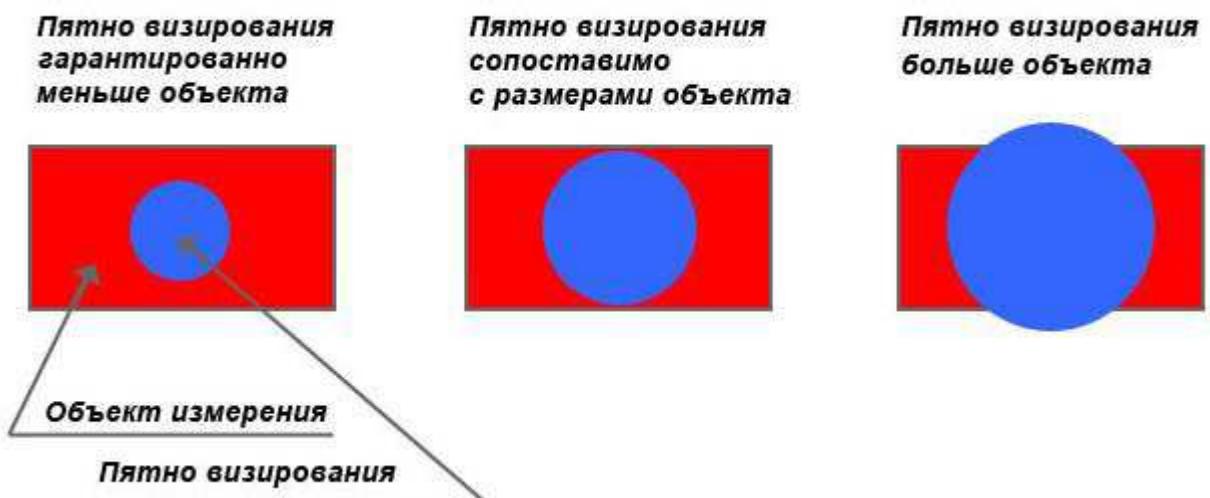


Рисунок 7 - Примеры расположения пятна относительно объекта измерения

Первый вариант - правильный: объект с гарантированным запасом перекрывает пятно визирования. Второй вариант - нежелательный: размеры объекта сопоставимы с пятном визирования, при небольшом уменьшении геометрических размеров объекта или частичного ухода объекта пиromетр будет занижать. Третий вариант - неправильный: пятно визирования больше объекта, пиromетр будет всегда занижать [10].

2.4 Применяемые средства контроля и мониторинга температуры

Контроль температуры узлов на ГЭС осуществляется с использованием:

- 1) Стационарной системы с помощью датчиков.
- 2) Переносной системы - тепловизионный контроль, с помощью специального прибора, тепловизора [11, с. 76].

2.4.1 Стационарная система теплового контроля

Система в себя включает контактные датчики, которые ведут непрерывное измерение температуры жидких и газообразных сред. Измерительным узлом датчика является чувствительный элемент, представляющий собой намотку из платиновой проволоки или платиновый напыленный элемент. Элемент помещен в защитную арматуру и включен в электрическую цепь термосопротивления.

Принцип работы датчика основан на свойстве чувствительного элемента изменять свое электрическое сопротивление в зависимости от изменения температуры [11, с. 78]. Сопротивление датчиков измеряется и преобразуются в цифровую форму посредством модулей аналогово ввода, расположенных в шкафу ТК. Дальнейшая обработка оцифрованных данных о температуре производится контроллером ПТК ТК. Если текущая температура измеряемая датчиками, превышает значение, заданное предупредительных или аварийных уставок, ПТК ТК формирует и передает соответствующие сигналы и команды в ПТК технологической автоматики и измерения состояния САУ ГА.

Основным минусом таких датчиков является, недопустимая для гидроагрегатов тепловая инерция, которая достигает порядка 20 секунд. При такой инерции агрегат успеет совершить большое количество вращений, до того как будет известно, что имеется нагрев какого либо участка, где установлены такие датчики.

На рисунке 8 показана установка стационарного датчика температуры в сегмент генераторного подшипника.



Рисунок 8 - датчик ТК в сегменте подшипника

2.4.2 Температурный контроль подпятников

Контроль за состоянием подпятников гидроагрегатов в процессе их эксплуатации осуществляется по их температуре. Повышение температуры сверх нормальных значений для данного времени года является признаком появления неисправности. Применяющаяся в настоящее время система термоконтроля способна отметить плавное медленное повышение температуры сегментов и масла, вызванное ухудшением состояния системы охлаждения (засорение маслоохладителей) или общим ухудшением состояния подпятника (ухудшение состояния поверхности трения в процессе эксплуатации). Такая

система термоконтроля недостаточно чувствительна и слишком инерционна для регистрации быстро развивающихся повреждений поверхностей трения и предотвращения аварийных повреждений. Если по каким-либо причинам происходит повреждение поверхности сегментов, сопровождающееся быстрым повышением температуры, то существующая система термоконтроля слишком поздно реагирует на него, и остановка агрегата защитой происходит уже после того, как авария произошла (значительное подплавление рабочей поверхности сегментов, иногда повреждение зеркальной поверхности диска). Таким образом, авария не предупреждается, а лишь регистрируется [2, с. 223].

Как правило, датчики температуры устанавливаются в сегментах довольно далеко от рабочей поверхности: в различных конструкциях это расстояние составляет 20—40 мм. Температура сегмента на таком расстоянии от рабочей поверхности значительно отличается от температуры на рабочей поверхности, а изменение температуры в месте замера запаздывает по сравнению с изменением температуры на рабочей поверхности. Наиболее нагретая зона рабочей поверхности сегмента находится между центром и сбегающей кромкой со смещением к наружному краю сегмента [2, с. 224].

2.4.3 Переносная система теплового контроля

В связи с тем, что не все оборудование охвачено системой стационарного теплопротекания, большое распространение получила переносная система теплового контроля.

При начальной стадии развития дефектов электрооборудования, которые обычно проявляются в виде локальных нагревов. Наиболее эффективным методом контроля оборудования является тепловизионный контроль. Исследование объектов с помощью тепловизора - тепловизионный контроль. При тепловизионном контроле электрооборудования следует применять тепловизоры с разрешающей способностью $0,1\ldots0,2^{\circ}\text{C}$. Это означает, что две точки объекта с разностью температуры $0,1..0,2^{\circ}\text{C}$ будут отличаться цветом. Тепловизионный контроль производится в рабочем состоянии оборудования, то есть под нагрузкой и напряжением. Результаты обследования в таком состоянии являются более достоверными, чем результаты обследований после снятия нагрузки или напряжения. Тепловизионный контроль проводится без отключения оборудования и в любое время. Поэтому тепловизионное обследование оборудования не мешает предприятию выполнять свою основную задачу по передаче и распределению электроэнергии. Тепловизионный контроль позволяет предупредить возникновение аварийной ситуации электрооборудования и тем самым повысить надежность электроснабжения потребителей, снизить затраты на ремонт, так как повреждения выявляются на ранних стадиях, оценить состояние оборудования с определением запаса его работоспособности [11, с. 80].

На рисунке 9 представлен снимок тепловизора, сделанный на контактных кольцах генератора.

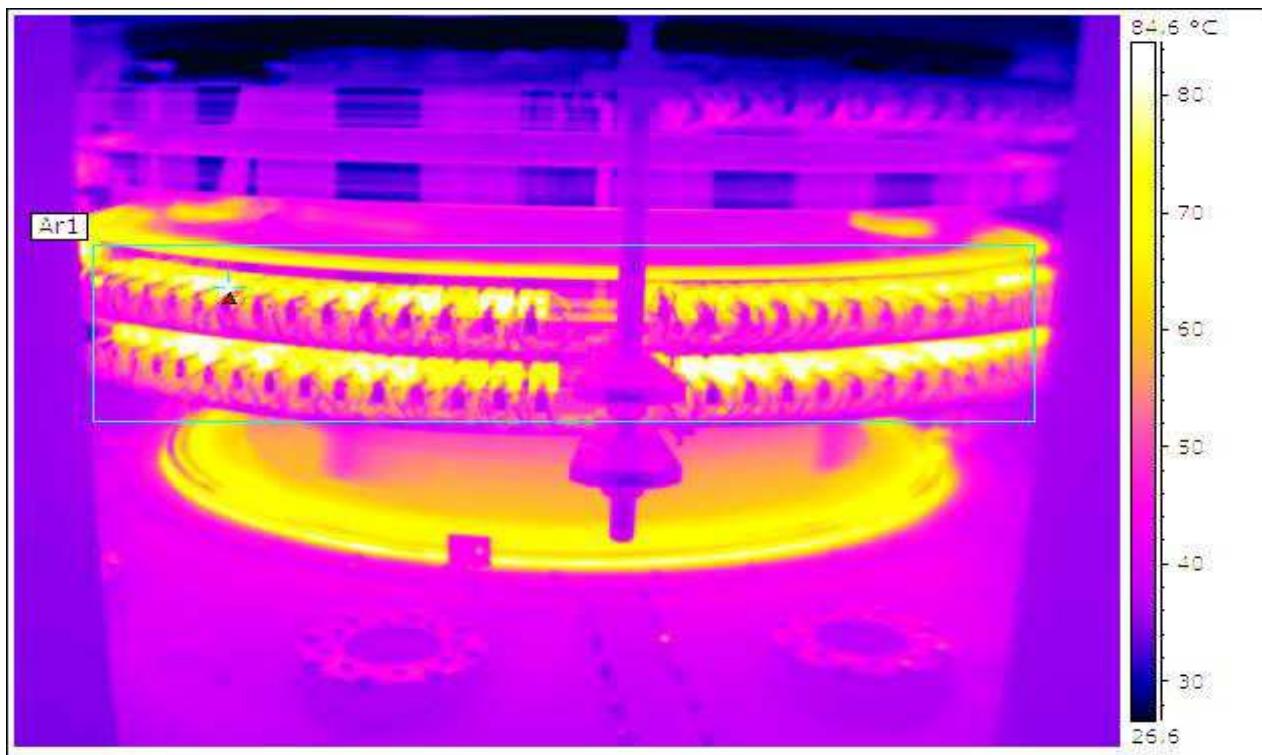


Рисунок 9 – Контактные кольца генератора

2.5 Решение проблемы измерения температуры вращающихся частей

Существуют различные методы для измерения температуры, но все они делятся на контактный способ и бесконтактный способ. При использовании контактного способа возникают следующие недостатки:

- большая тепловая инерция;
- невозможность наблюдения и измерения температуры на расстоянии;
- невозможность измерения поля температур из-за размеров чувствительного элемента и исследуемого объекта;
- невозможность измерений движущихся элементов по причине трения между чувствительным элементом и исследуемым объектом [12].

В случае использования бесконтактного способа удается избежать искажений температурного поля объекта измерений, так как не требуется непосредственного соприкосновения термоприемника с телом [12].

В дальнейшей работе будет рассмотрен вариант применения бесконтактных (инфракрасных) датчиков в различных частях гидроагрегата (подпятника, подшипников и ротора гидрогенератора) и разработана методика, позволяющая оценить влияние температуры на вибрацию.

Для своевременного контроля вращающихся ответственных узлов, таких как поверхности трения (диск пяты, ступицы, поверхности вала, полюсов ротора) предлагается использовать инфракрасные датчики, на примере представленных в таблице 1.

В связи с высокой стоимостью высокосортных ИК датчиков, и особенностями условиями эксплуатации. Мы предлагаем решить проблему

скорости сбора данных, путем разработки программного обеспечения и методики, которое позволит использовать представленные датчики для контроля недоступных участков.

Таблица 1 - Инфракрасные датчики температуры

Название датчика	Точность	Диапазон температур	Показатель визирования	Время сбора данных
Omron ES1C	2°C	0 до 400°C	5:1	100 мс
Кельвин АРТО 350 Ц	1%+1°C	-50 до 350 °C	1:1	180 мс
Compact CS LT	±1,5 °C или ±1,5 %	-40 до 1030 °C	15:1	30 мс
Csmicro LT 15	±1 %, или ±1,5 °C	-20...350 °C	15:1	25 мс
ТЕККНОЙ Cthot LT02H	±1,5 °C или ±1 %	-40...975 °C	10:1	100 мс
HIGH PERFORMANCE LT	±1%, но >±1 °C	-50...975 °C	15:1	120 мс
OD 100 GA 150	±1%, но >±1 °C	0...150 °C	10:1	100 мс

Датчики в данной таблице обладают классом защиты IP 68, т.е никакого шума и пыли, а также есть возможность применения в жидкостях, например в масле. Производитель гарантирует работу датчиков в масле [13].

Масло обладает коэффициентом пропускания примерно равным $\epsilon \approx 0,95$.

Имеет высокую способность пропускать инфракрасное излучение.

Сталь имеет коэффициентом излучения в пределах 0,8 – 0,9.

Объекты измерения с высоким коэффициентом излучения $\epsilon \geq 0,8$:

—имеют низкий коэффициент отражения $\rho = 1 - \epsilon$;

—температуры данных объекта можно очень легко измерить с помощью ИК датчика [13].

Есть источник излучения – твердое вращающееся тело. На поверхности которого, распределяется температура по синусоидальному закону.

Мощность излучения тела по такому закону выражается законом Стефана-Больцмана:

$$Q = \sigma \cdot T^4, \quad (1)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{К}^4)$ –постоянная Стефана-Больцмана;

T - температура абсолютно черного тела.

2.6 Вывод

Развитию повреждения способствует несовершенство температурного контроля, а иногда его отсутствие в части сегментов. При наличии чувствительного и эффективного термоконтроля, способного отмечать повышение температуры в начальной стадии повреждения, размер повреждения под пятника можно было бы уменьшить до одного или нескольких

сегментов, а не всех [4, с. 9].

Чувствительными и эффективными средствами являются быстро действующие бесконтактные инфракрасные датчики. С помощью которых, можно измерять важные врачающиеся узлы агрегата.

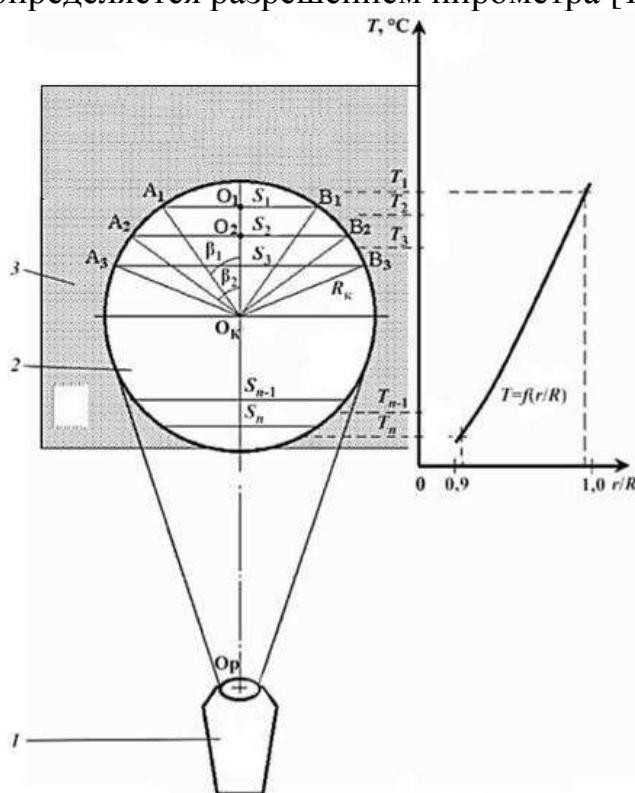
Необходимо учесть тот и тот факт, что не все сегменты оснащены стационарными датчиками температуры. И если использовать предлагаемый метод оценки состояния вращающихся частей с помощью инфракрасных датчиков, то можно оперативно реагировать на изменение температуры в системе.

3 Моделирование работы датчиков и системы контроля температуры вращающихся частей и зон нагрева

3.1 Пятно сканирования датчика

Выполнение температурного контроля поверхности вращающихся частей агрегат во время работы при помощи современных инфракрасных термометров (низкотемпературных пирометров) неразрывно связано с учетом двух групп особенностей пирометрического метода измерения. Первая группа определяется устройством и характером нагрева исследуемого объекта, вторая группа обусловлена принципом действия средства измерения. В качестве объекта контроля был принят диск подпятник, так как по результатам ранее проведенных исследований, была установлена существенная зависимость работоспособности диска от температуры на различных участках поверхности. Кроме того, установлено, что зона нагрева при установившемся процессе работы располагается осесимметрично с максимальным значением температуры на периферии диска (условие положительного температурного перепада) [14].

Основными показателями инфракрасного термометра, которые влияют на результат измерения, являются разрешение (показатель визирования) и средняя температура на площади пятна сканирования. Форма и размеры пятна сканирования зависят от расположения излучателя пирометра относительно плоскости диска. При условии расположения оси луча сканирования по нормали к плоскости диска пятно сканирования представляет собой круг, диаметр которого определяется разрешением пирометра [15], рисунок 10.



- 1 – излучатель пирометра;
- 2 – пятно контроля;
- 3 – объект контроля.

Зная среднее значение температуры по площади сканирования, с учетом коэффициента теплового излучения диска, теоретически можно определить температуру кольца. Для этого следует в соответствии с расчетной схемой провести фрагментацию пятна сканирования на n равных по ширине частей [14].

Представим среднее значение температуры, показываемой пирометром, в виде:

$$T_{cp} = \frac{T_1 \cdot S_1 + T_2 \cdot S_2 + \cdots + T_n \cdot S_n}{S} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i \cdot S_i}{S}, \quad (2)$$

где T_i и S_i – температура и площадь i -го фрагмента;
 S – общая площадь пятна сканирования.

$$S = \pi \cdot R_k^2, \quad (3)$$

где R_k – радиус пятна сканирования.

$$R_k = \frac{|O_k O_P|}{2 \cdot \nu}, \quad (4)$$

где ν – разрешение пирометра.

Общая площадь фрагментов равна площади пятна сканирования, следовательно:

$$T_{cp} = \frac{T_1 \cdot k_1 \cdot S + T_2 \cdot k_2 \cdot S + \cdots + T_n \cdot k_n \cdot S}{S}. \quad (5)$$

Или

$$T_{cp} = T_1 \cdot k_1 + T_2 \cdot k_2 + T_n \cdot k_n = \sum_{i=1}^n T_i \cdot k_i, \quad (6)$$

где k_i – доля площади i -го фрагмента,

$$k_i = \frac{S_i}{S}. \quad (7)$$

Характер изменения температуры по радиусу диска в пределах текущего радиуса ($r = 0,9 \dots 1,0$) просто и точно отражается линейной зависимостью [14].

$$T_i = T_{i+1} - \Delta T. \quad (8)$$

Тогда формула (6) примет вид:

$$T_{cp} = T_1 \cdot k_1 + (T_1 - \Delta T) \cdot k_2 + (T_1 - 2\Delta T) \cdot k_3 + \dots + (T_1 - (i-1)\Delta T) \cdot k_i + \dots + (T_1 - (n-1)\Delta T) \cdot k_n. \quad (9)$$

Температура кольца шириной ΔR :

$$T_1 = T_{cp} + \Delta T \cdot \left(\sum_{i=1}^n (i-1) \cdot k_i \right). \quad (10)$$

Температура поверхности любого i -го колец в пятне сканирования:

$$T_i = T_1 - (n-1)\Delta T; \quad i = 2, 3, \dots, n. \quad (11)$$

Данный метод расчета температуры в пятне сканирования пирометра является упрощенным, так как в нем принята плоскопараллельная схема фрагментов сегментов, а площади равноотстоящих от продольной оси фрагментов равны. Разработанный метод определения температуры нагрева вращающихся частей при помощи средств пирометрии может быть использован в исследованиях теплофизических процессов оборудования [14].

Результат измерений пирометром зависит от показателя визирования (разрешения) и средней температуры на площади пятна сканирования T_{cp} [14].

3.2 Расчет пятна сканирования на поверхности диска подпятника

В качестве модели будем рассматривать диск двухрядного подпятника, который находится в установившемся режиме работы ГА. Предположим, что температура диска равна температуре сегментов подпятника. Температура внутренних сегментов равна 51°C, а температура внешних сегментов равна 57°C. Данные полученные от стационарных средств измерения - термопар. Из этих данных следует предположить, что самая высокая температура находится на периферии диска. Это так же доказывает факт, что самая удаленная точка от центра диска вращается быстрее чем, те точки, которые находятся ближе к центру. А так же, площадь трения диска и сегментов больше на внешней стороне.

Предположим, что ИК датчик расположен на расстоянии 10 см (100 мм) до объекта контроля, с разрешением ИК датчика 10:1. Датчик показывает

среднюю температуру 57°C (внешняя сторона диска). Найдем, как распространяется температура в пятне сканирования.

Радиус пятна сканирования на поверхности диска под пятникою найдем по формуле (4):

$$R_k = \frac{100}{2 \cdot 10} = 5 \text{ мм.}$$

Площадь пятна сканирования определим по формуле (3):

$$S = 3,14 \cdot 5^2 = 78,5 \text{ мм}^2.$$

Разобъем пятно сканирования на 10 фрагментов, с шагом ΔR :

$$\Delta R = \frac{2 \cdot R_k}{n} = \frac{2 \cdot 5}{10} = 1 \text{ мм.} \quad (12)$$

Рассчитаем площади этих фрагментов:

$$S_i = \frac{1}{2} \cdot R_k^2 \cdot \left(\frac{2\pi\beta_i}{180^\circ} - \sin 2\beta_i \right) - (S_1 + S_2 + \dots + S_{i-1}). \quad (13)$$

Первый фрагмент:

$$S_1 = S_{01A1B1} = \frac{1}{2} \cdot R_k^2 \cdot \left(\frac{2\pi\beta_1}{180^\circ} - \sin 2\beta_1 \right). \quad (14)$$

Центральный угол можно определить из следующих соотношений:

$$\cos \beta_1 = \frac{|O_k O_1|}{R_k}, \quad (15)$$

$$|O_k O_1| = R_k - \Delta R, \quad (16)$$

$$\beta_i = \cos^{-1} \left(\frac{R_k - i \cdot \Delta R}{R_k} \right). \quad (17)$$

Тогда по формуле (17) получаем:

$$\beta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{R_k - \Delta R}{R_k} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{5 - 1}{5} \right) = 36,87^\circ.$$

Тогда площадь первого фрагмента рассчитаем по формуле (14):

$$S_1 = S_{01A1B1} = \frac{1}{2} \cdot 5^2 \cdot \left(\frac{2\pi \cdot 36,87^\circ}{180^\circ} - \sin 2 \cdot 36,87^\circ \right) = 4,08 \text{ мм}^2.$$

Доля от площади по формуле (7):

$$k_1 = \frac{S_1}{S} = \frac{4,08}{78,5} = 0,0519.$$

Температура в первом фрагменте рассчитаем по формуле (10):

$$T_1 = 57 + 0,223 \cdot 4,5 = 58^\circ\text{C}.$$

Рассчитаем площадь второго фрагмента:

$$S_2 = S_{02A2B2} - S_1 = \frac{1}{2} \cdot R_k^2 \cdot \left(\frac{2\pi\beta_2}{180^\circ} - \sin 2\beta_2 \right) - S_1. \quad (18)$$

Остальные данные рассчитаем по формулам, которые указаны выше:

$$\beta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{5 - 2}{5} \right) = 53,13^\circ,$$

$$S_2 = \frac{1}{2} \cdot 5^2 \cdot \left(\frac{2\pi \cdot 53,13^\circ}{180^\circ} - \sin 2 \cdot 53,13^\circ \right) - 4,08 = 7,09 \text{ мм}^2,$$

$$k_2 = \frac{S_2}{S} = \frac{7,09}{78,5} = 0,0903.$$

Температура во втором фрагменте рассчитаем по формуле (11):

$$T_2 = T_1 - (2 - 1)\Delta T = 58 - 0,223 = 57,78^\circ\text{C}.$$

Так же рассчитаем остальные фрагменты, результат представлен в таблице 2.

Таблица 2 - Результат вычислений 1 точки

Номер фрагмента	Площадь $S_i, \text{мм}^2$	Доля от площади k_i	Температура, $^{\circ}\text{C}$
1	4,08	0,05197	58,00
2	7,09	0,09033	57,78
3	8,63	0,10996	57,56
4	9,52	0,12124	57,33
5	9,93	0,12650	57,11
6	9,93	0,12650	56,89
7	9,52	0,12127	56,67
8	8,63	0,10994	56,44
9	7,09	0,09032	56,22
10	4,08	0,05197	56,00

По полученным данным таблицы, построим график зависимостей $T = f(n)$, рисунок 11.

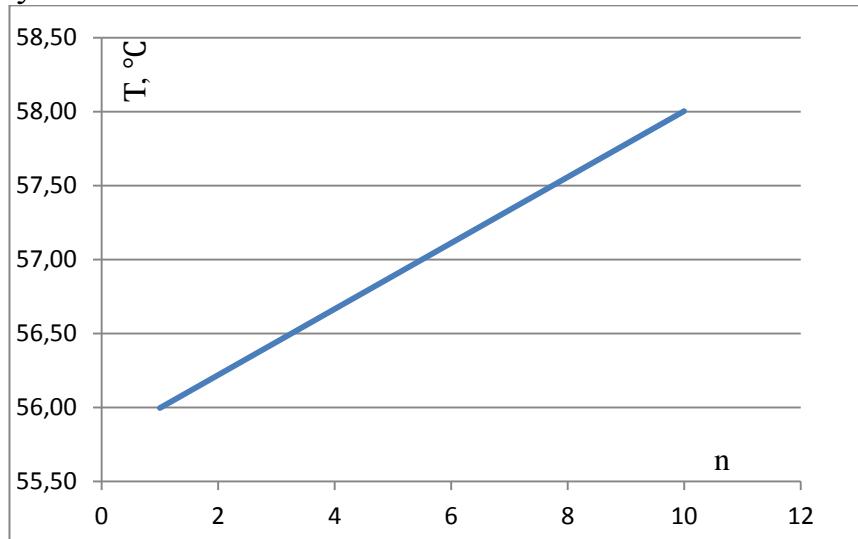


Рисунок 11 – Распределение температуры в пятне сканирования

Рассмотрим ИК датчик с разрешением 5:1, при тех же условиях, что были описаны ранее.

Тогда радиус пятна сканирования по формуле (4) равен:

$$R_k = \frac{100}{2 \cdot 5} = 10 \text{ мм.}$$

Площадь пятна сканирования определим по формуле (3):

$$S = 3,14 \cdot 10^2 = 314 \text{ мм}^2.$$

Дальнейшие расчеты повторяются, поэтому представим их в таблице 3 и на рисунке 12.

Таблица 3 - Результат вычислений

Номер фрагмента	Площадь $S_i, \text{мм}^2$	Доля от площади k_i	Температура, $^{\circ}\text{C}$
1	16,32	0,05197	58,55
2	28,37	0,09033	58,21
3	34,53	0,10996	57,86
4	38,07	0,12124	57,52
5	39,72	0,12650	57,17
6	39,72	0,12650	56,83
7	38,07	0,12124	56,48
8	34,53	0,10997	56,14
9	28,37	0,09035	55,79
10	16,32	0,05197	55,45

По полученным данным таблицы 3, построим график зависимостей $T = f(n)$, рисунок 12.

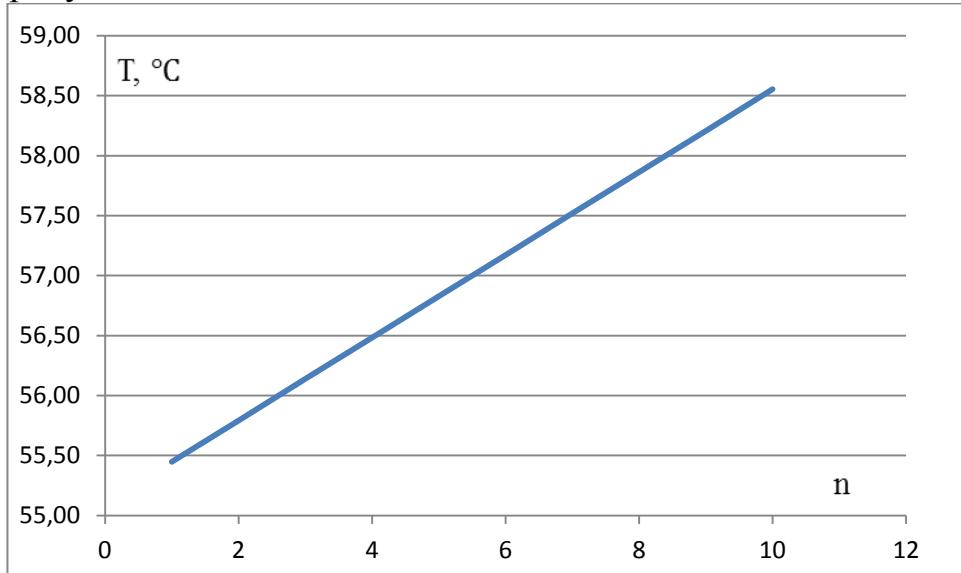


Рисунок 12 – Распределение температуры в пятне сканирования

В результате получили, что при использовании ИК датчика с меньшим разрешением, пятно сканирования имеет больший размер на объекте контроля.

3.3 Расположение датчиков для контроля вращающихся частей

3.3.1 Ротор гидроагрегата

Для измерения температуры вращающегося ротора ГА достаточно одного датчика для измерения температуры полюсов, рисунок 13.

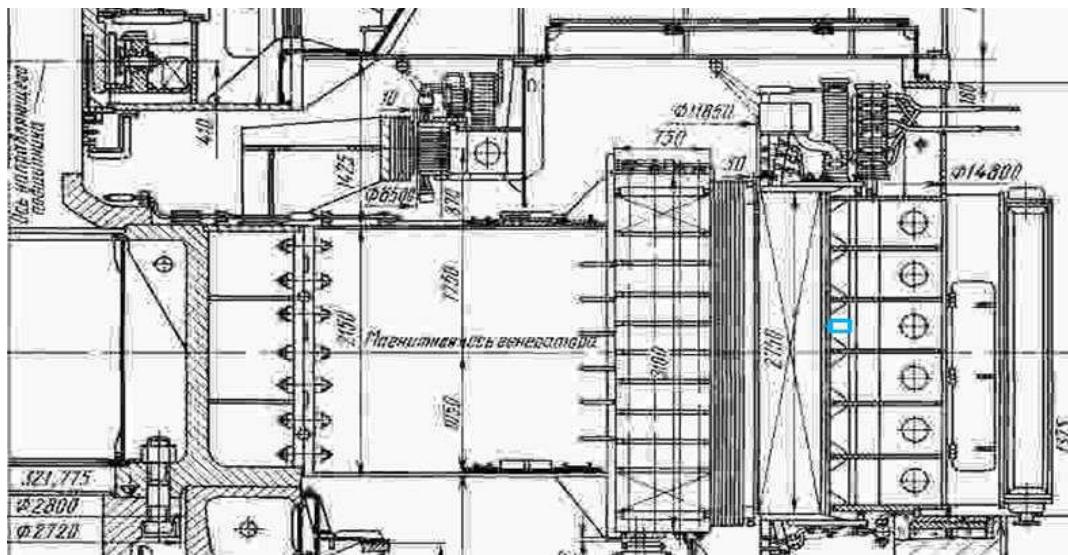


Рисунок 13 – Расположение датчика ИК

Сенсор датчика должен находиться за сердечником статора, тепловой луч будет проходить через световой канал.

Превышение температуры ротора может свидетельствовать о плохом охлаждении или межвитковом замыкании обмотки ротора.

3.3.2 Подпятник гидроагрегата

Для анализа диска подпятника, необходимо не менее трех датчиков для измерения температуры, на внешней стороне, на внутренней стороне и посередине объекта контроля. На рисунке 14, показана красными линиями, траектория контроля поверхности диска пяты с использованием инфракрасных датчиков.

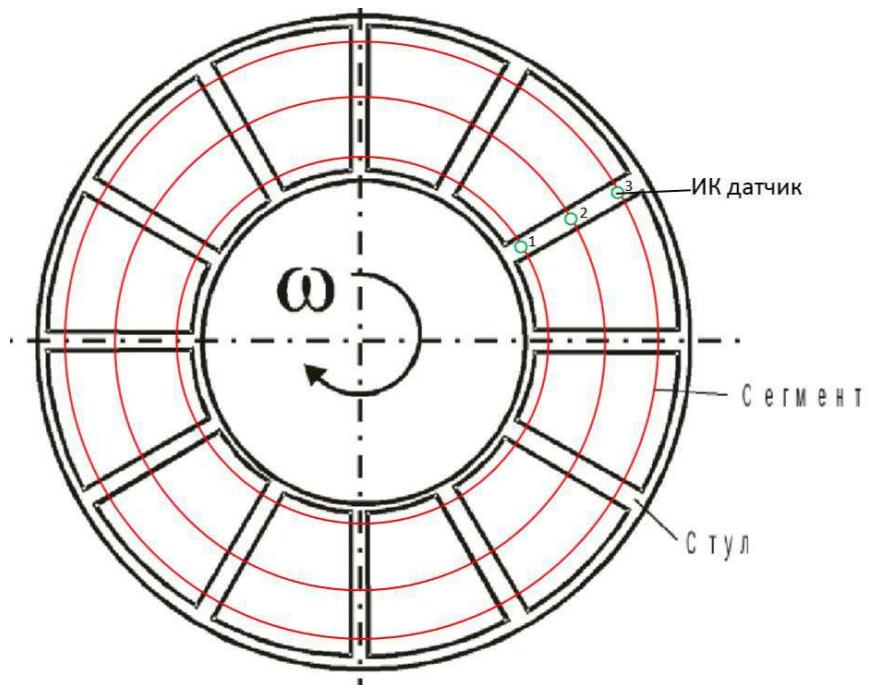


Рисунок 14 – Расположение и траектория контроля поверхности диска пяты с использованием инфракрасных датчиков

При этом: 1 точка – датчик расположен на внутренней стороне, 2 точка – датчик расположен посередине, 3 точка – датчик расположен на внешней стороне.

Датчики будут располагаться в зазорах между сегментами подпятника, рисунок 15.

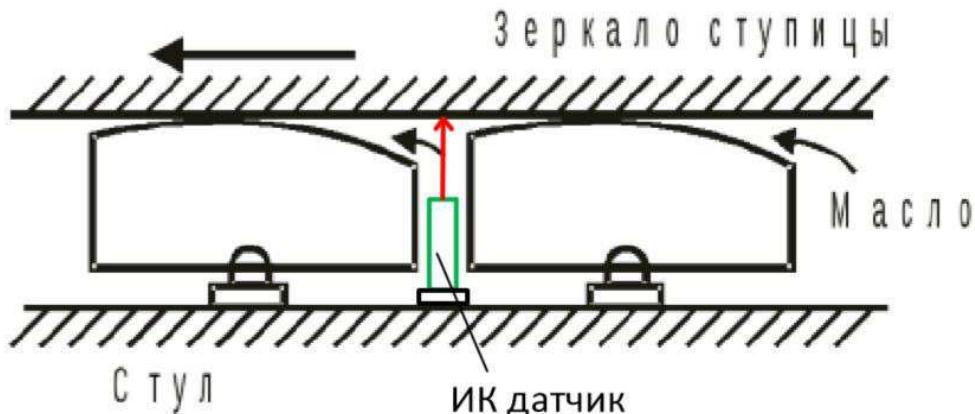


Рисунок 15 - Расположение ИК датчиков

Самая высокая температура находится на внешней стороне диска, которую будет измерять датчик 3. Так как угловая скорость диска выше на внешней стороне чем на внутренней. И площадь трения диска и сегментов больше в этом месте, на внешней стороне.

Рассмотрим распределение температур по поверхности диска однорядного подпятника. К примеру, распределение может быть таким как на рисунок 16.

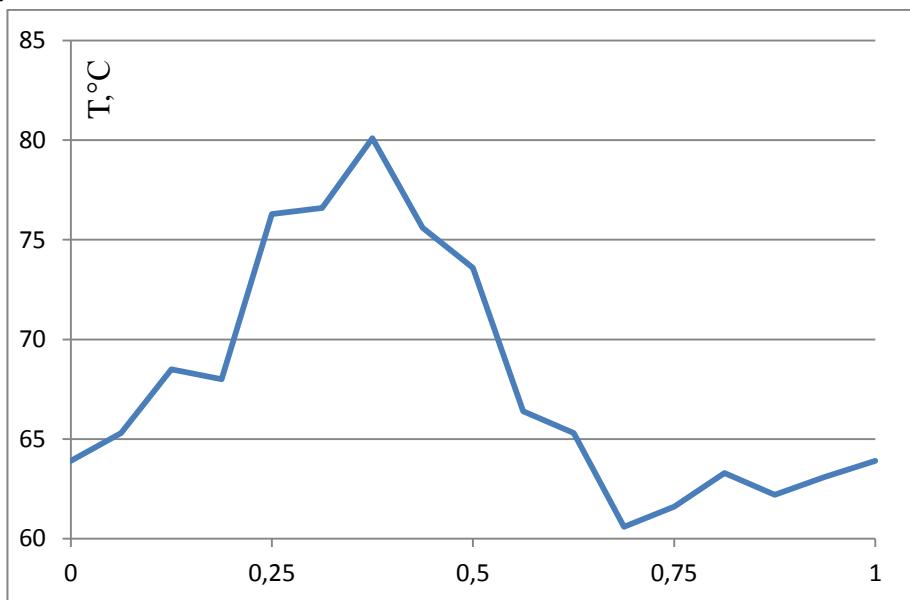


Рисунок 16– Распределение температуры по траектории поверхности контроля диска пяты

Из рисунка 16 видно, что при фиксации отметчиком одного оборота, температура на поверхности диска резко увеличилась. Это является первым признаком дефекта и поводом к необходимости принятия мер по его устранению.

3.5 Описание программируемой системы

В качестве исходных данных были приняты значения температуры, которая распространяется по поверхности диска подпятника. Это данные в виде одномерного массива T и x , состоящие из 17 значений. x – это перемещение диска подпятника относительно отметчика оборотов, в конечной или начальной точке графика. Диаметр диска приняли равным 6 м. График исходных данных представлен на рисунке 17.

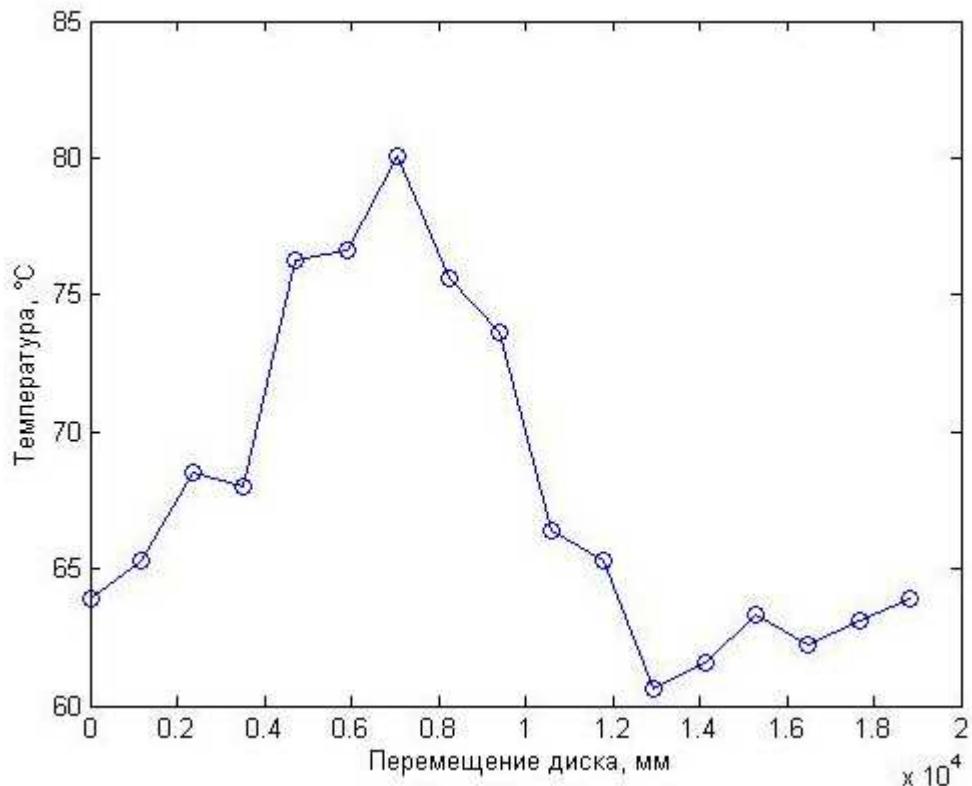


Рисунок 17 – Распределение температуры по поверхности диска

Полученный график из исходных данных, состоит из 16 отрезков. Разбиваем эти отрезки на временные участки. Для этого разделим каждый отрезок, на 10 маленьких участков по температуре dt и по перемещению dx . Для сбора данных о температуре с каждого участка, и для дальнейшего получения значений тепловой энергии, выполненной со смещением относительно отметчика оборотов. Получили 160 точек значений температуры, распространяющейся на поверхности диска подпятника, рисунок 18.

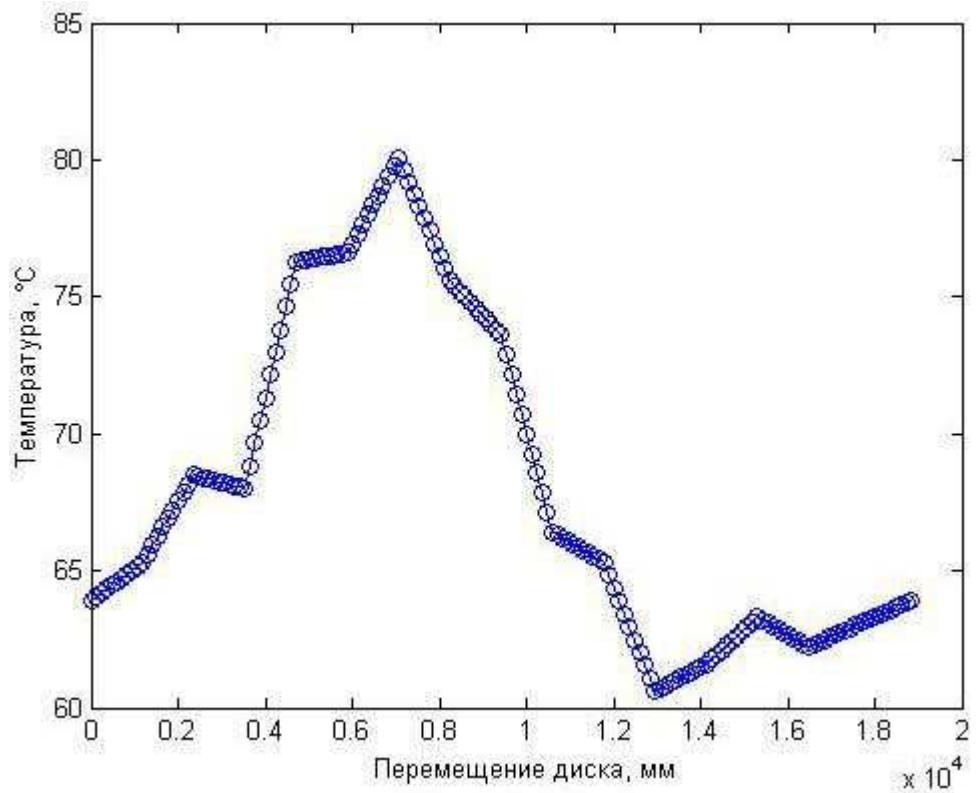


Рисунок 18 – Распределение температуры по поверхности диска

Далее, полученные значения температуры, 160 точек, преобразуем в 160 точек значений выделяемой количества тепловой энергии, распределенной по поверхности диска, по формуле (1). Получили рисунок 19.

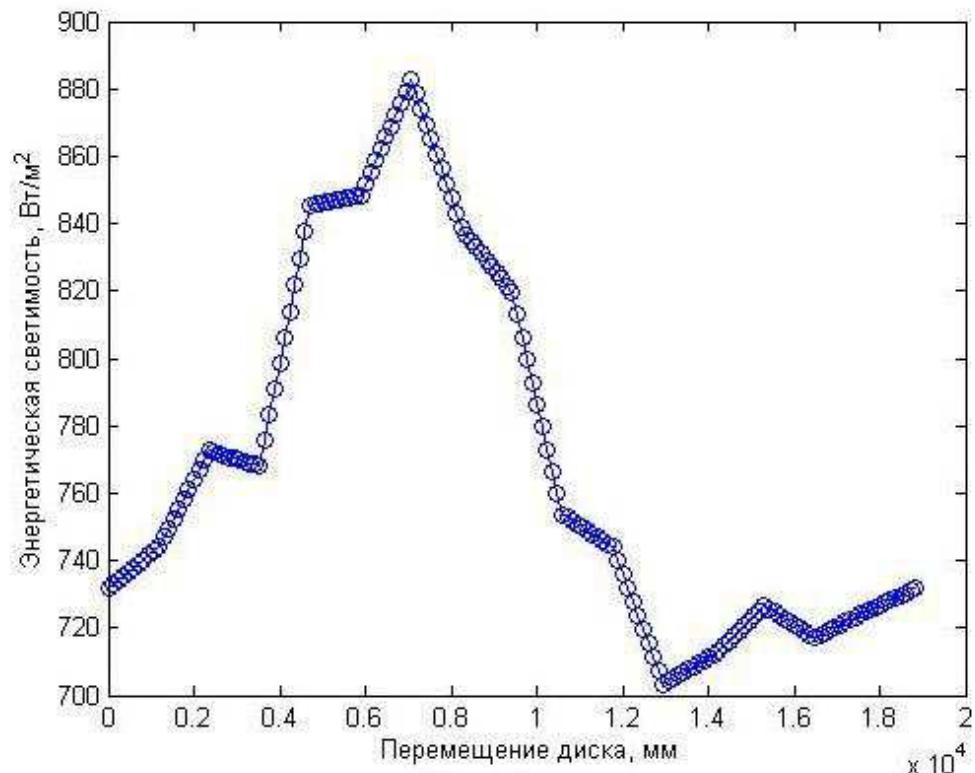


Рисунок 19 – Количество тепловой энергии

Теперь, когда нам известно, как распространяется тепловая энергия по поверхности диска, приступаем к выбору датчика, с помощью которого мы измерим нагрев поверхности диска.

Из таблицы 1 выберем три датчика температуры с различным временем сбора данных контролируемого объекта.

Это датчики:

- 1) Optis Compact CS LT,
- 2) Omron ES1C,
- 3) Кельвин Арто 350 Ц.

Для дальнейшего программирования системы определения температуры вращающихся узлов, нас интересует время сбора данных выбранных датчиков.

Время сбора дынных датчиков:

$$D1 = 25 \text{ мс},$$

$$D2 = 100 \text{ мс},$$

$$D3 = 180 \text{ мс.}$$

Рассчитаем время, за которое агрегат совершил один оборот.

При вращениях частота гидроагрегата определяется как:

$$f_{\text{об}} = \frac{n_h}{60}, \quad (19)$$

где n_h – число оборотов в минуту.

Для агрегатов Саяно-Шушенской ГЭС оборотная частота будет при номинальной частоте вращения $n_h = 142,8 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$:

$$f_{\text{об}} = \frac{142,8}{60} = 2,38 \text{ Гц.}$$

Найдем время, за которое совершается 1 оборот агрегата:

$$T_{1 \text{ об}} = \frac{1}{f_{\text{об}}} = \frac{1}{2,38} = 0,42 \text{ с.} \quad (20)$$

Рассчитаем, какое количество раз, сработает датчик при совершении агрегата одного оборота:

$$D1 = \frac{0,42}{0,025} = 16 \text{ раз,}$$

$$D2 = \frac{0,42}{0,1} = 4 \text{ раза},$$

$$D3 = \frac{0,42}{0,18} = 2 \text{ раза.}$$

Критерием выбора датчика является его точность. Чем меньше сработает датчик при совершении агрегата одного оборота, тем меньше его точность. И сложнее сравнить его значения температуры с исходными данными.

Датчик $D3$ не учитываем в дальнейших расчетах, так как за одно оборот он сработает два раза, что будет недостаточным сбором данных для анализа температуры вращающихся частей агрегата.

Рассмотрим датчик $D1$. Данный датчик сработает 16 раз, при совершении агрегата одного оборота. Поэтому из полученных выше данных, рисунок 19, в результате программирования, рассчитаем среднеквадратичное значение для 16 участков, выделяемой тепловой энергии. Получили график, рисунок 20.

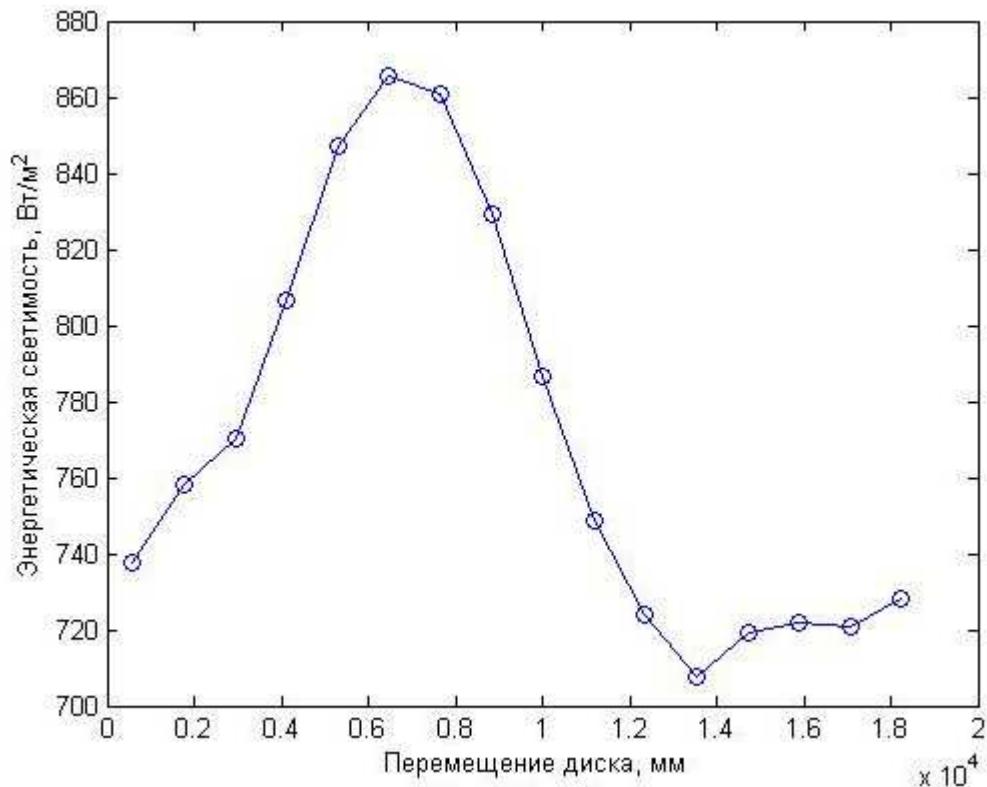


Рисунок 20 – Среднеквадратичное значение количества тепла

Далее, преобразуем получившуюся тепловую энергию в температуру, которая распространяется по поверхности диска.

Из формулы (1) получаем температуру:

$$T = \sqrt[4]{\frac{E}{q}} - 273,15,$$

где T – температура в градусах Цельсия.

Получили температуры, которую измерил датчик $D1$, рисунок 21.

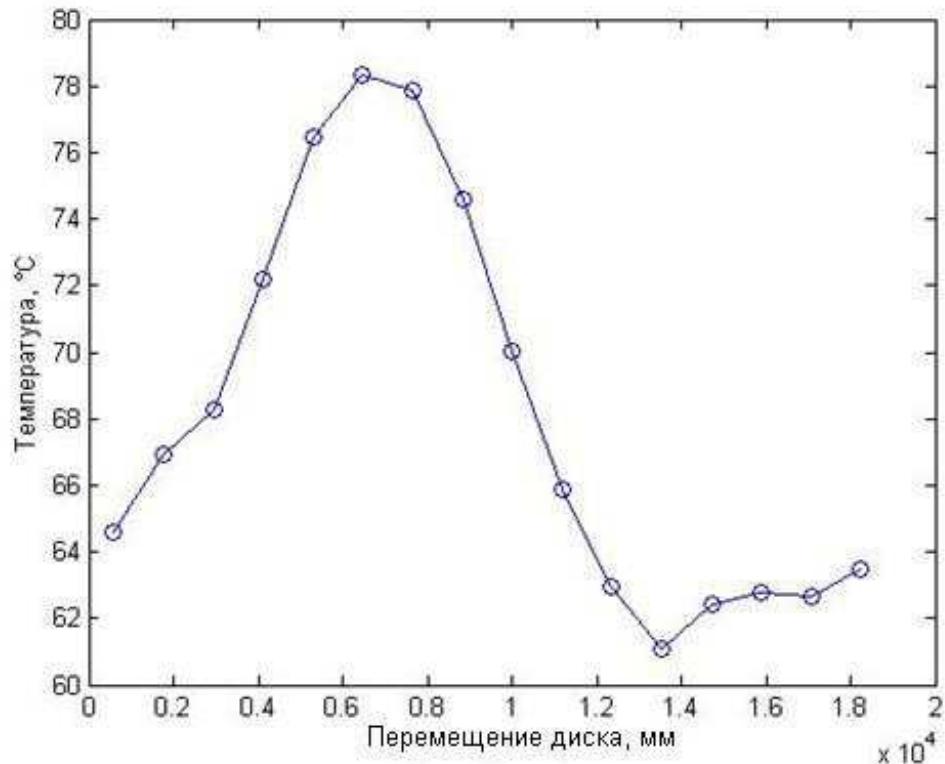


Рисунок 21 – Распределение температуры

В результате, полученную температуру от датчика $D1$ сравниваем с температурой, которая задана в исходных данных, рисунок 22.

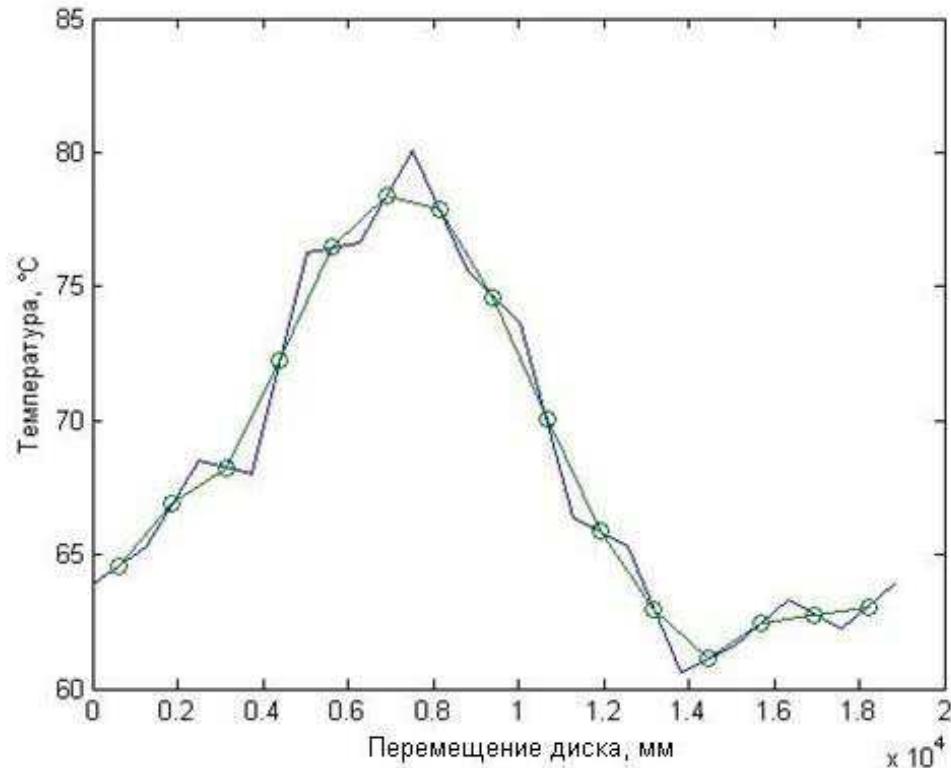


Рисунок 22 – Сравнение температур

Рассмотрим датчик $D2$, который сработает 4 раза, при совершении агрегата одного оборота.

Полученные значения количества тепловой энергии, состоящие из 160 точек, рисунок 19, разбиваем на количество раз, которое сработает датчик, 4 раза и получим 4 отрезка, каждый из которых состоит из 40 точек значений температуры. Рассчитаем среднеквадратичное значение для 4 участков тепловой энергии, рисунок 23.

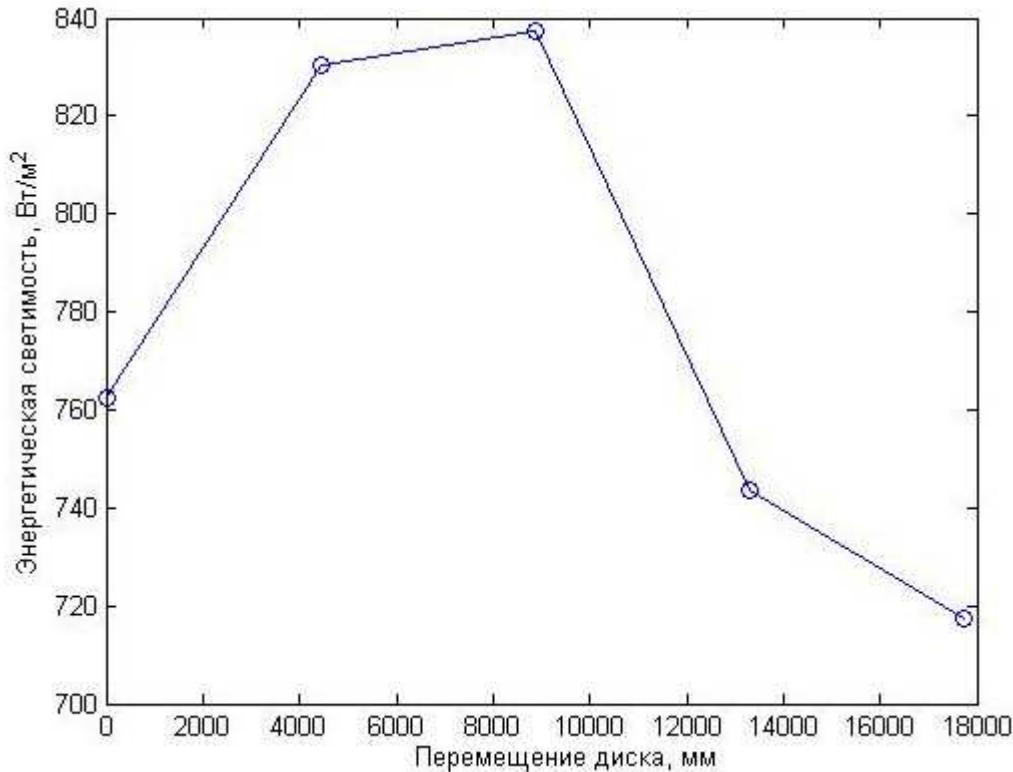


Рисунок 23 – Распределение количества энергии по 4 участкам

Преобразуем эти значения в температуру по формуле (1), которую измерил датчик $D2$, рисунок 24.

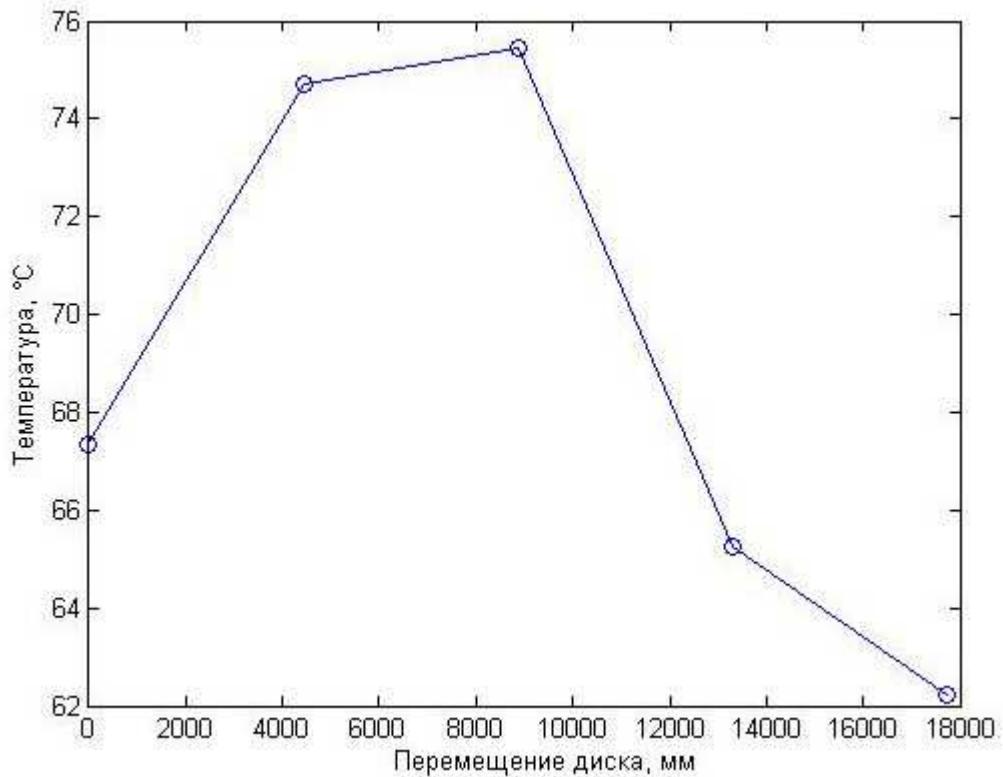


Рисунок 24 – Значения температур

В результате, полученную температуру от датчика D2 сравниваем с температурой, которая задана в исходных данных, рисунок 25.

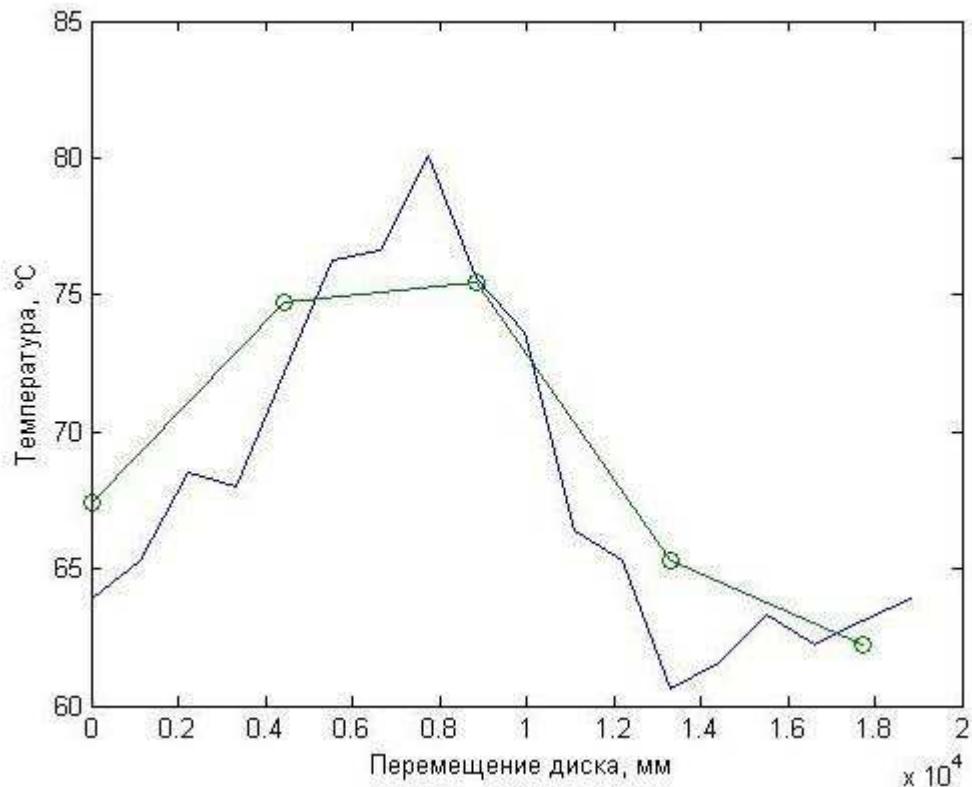


Рисунок 25 – Сравнение температур

Выполним общее сравнение температур, рисунок 26.

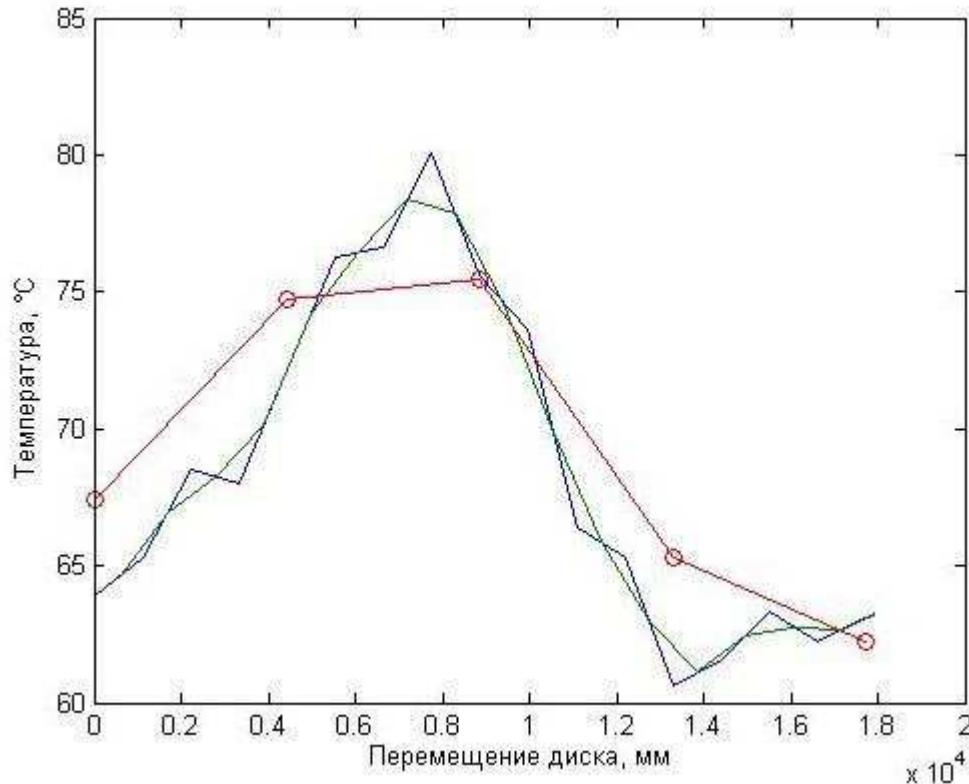


Рисунок 26 - Сравнение температур:
синяя линия – исходные данные;
зеленая линия – полученные данные с помощью датчика D_1 ;
красная линия – полученные данные с помощью датчика D_2

В приложении А, указан код программы.

Рассчитаем ошибку датчиков D_1 и D_2 . Для этого сравним полученные их градиенты температуры с градиентом исходных данных.

$$grad_{исх} = 80,1 - 60,6 = 19,5 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$grad_{D_1} = 78,36 - 61,1 = 17,26 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$grad_{D_2} = 75,45 - 62,2 = 13,25 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$\text{Ошибка } D_1 = 100 - \frac{17,26}{19,5} \cdot 100\% = 11,49 \%,$$

$$\text{Ошибка } D_2 = 100 - \frac{13,25}{19,5} \cdot 100\% = 32 \, \text{%.}$$

В результате получили достаточно точное описание формы температуры при использовании датчика D_1 . Это обусловлено высокой скоростью сбора данных датчика, а так же его высокой стоимостью.

Описанная форма температуры датчиком $D2$ качественно похожа, но имеет чуть большую ошибку. Датчик $D2$ обладает хорошей скоростью сбора данных, но его скорость меньше чем у датчика $D1$. Учитываем, что стоимость датчика $D1$ намного выше, чем у $D2$.

Поэтому, в расчетах будем принимать датчик $D2$, который сработает 4 раза при совершении агрегата одного оборота. Но здесь необходимо разработать дополнительную методику, которая позволит определить есть ли в реальности дефект или нет, а так же разработать алгоритм сбора данных для датчика $D2$.

3.6 Алгоритм работы системы сбора данных

Мы разбиваем объект контроля (ротор, диск подпятника, вал) на временные участки. С помощью ПО собираем данные о тепловой энергии с каждого участка. Смещаясь относительно отметчика оборотов на дифференциально малый участок, строим поле энергии, из которой позже найдем первообразную температуры по поверхности объекта контроля. Большой градиент температур будет первым признаком дефекта на объекте контроля. По анализу полученных данных будут выдаваться рекомендации по эксплуатации гидроагрегата.

Отметчик оборотов фиксирует частоту вращения агрегата, рисунок 27. И посыпает информацию в систему сбора данных.

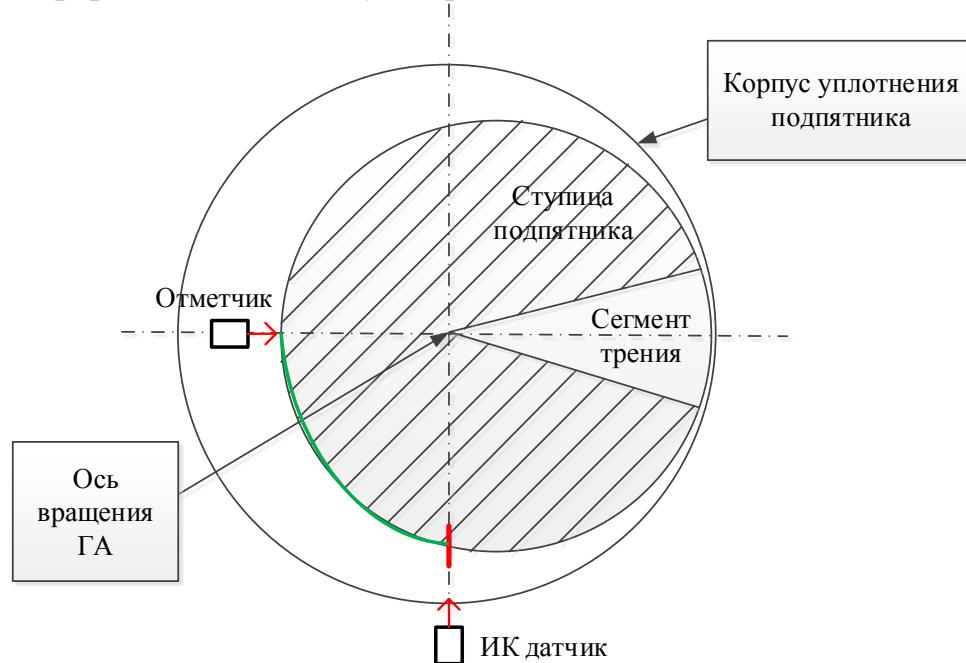


Рисунок 27 – Сбора данных без смещения

Так же в систему сбора данных включены, такие параметры как вибрация и температура узлов агрегата. Инфракрасные датчики, которые используются в работе, так же будут посылать сигналы в систему сбора данных агрегата, рисунок 28.

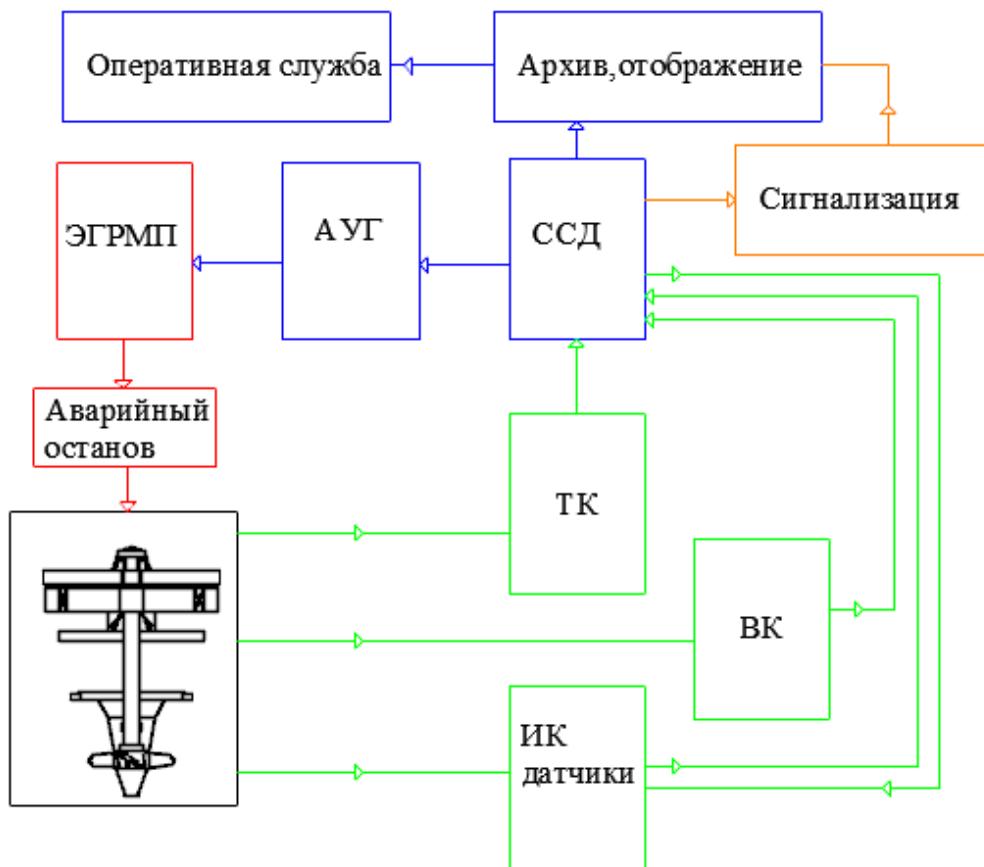


Рисунок 28 - Структурная схема действия системы:
 ТК – шкаф теплового контроля; ВК – шкаф виброконтроля;
 ИК – шкаф ИК датчиков; ССД – система сбора данных;
 АУГ – автоматика управления гидроагрегата;
 ЭГРМП – электрогидравлический регулятор микропроцессорный

ССД имеет возможность направлять управляющий сигнал на ИК датчик, для того, чтобы он начинал собирать данные, а так же решать, когда организовать задержку в работе датчика. Так же у ССД есть возможность синхронизировать работу датчика с вращением гидроагрегата, собирать данные с одного и того же участка тела вращения.

Четырех участков мало для оценки температуры вращающихся частей. Если использовать только четыре участка, то получается значимая ошибка и маленькая возможность увидеть развитие дефекта. Для того чтобы была ясная картина измерения температуры с помощью датчика D_2 , необходимо смещаться на небольшой участок dx , при каждом новом обороте агрегата, рисунок 29.

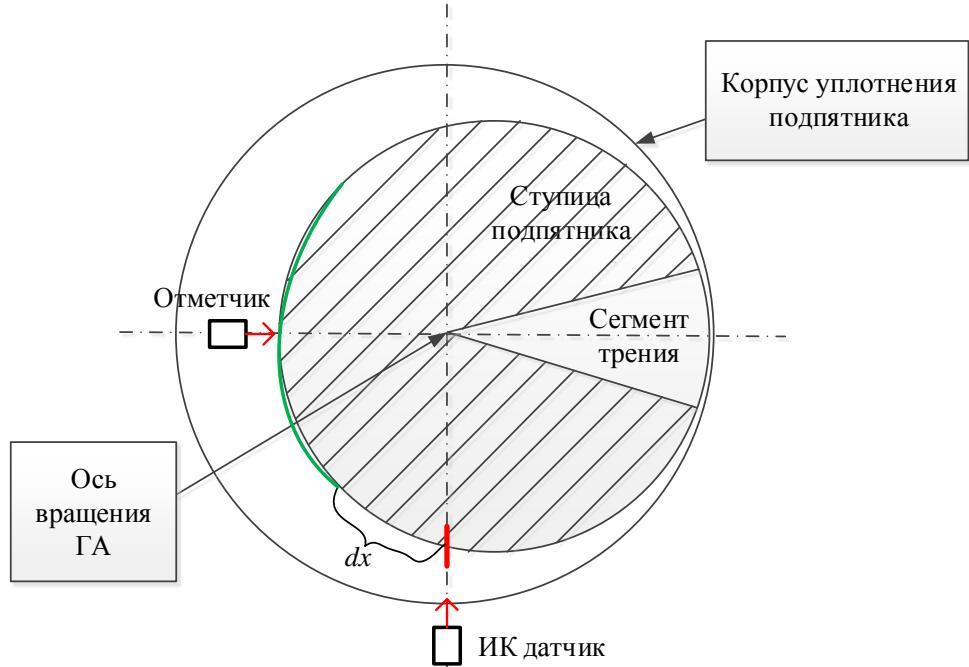


Рисунок 29 – Сбор данных со смещением

Зеленая линия рисунка 27 означает работу датчика при первом обороте агрегата. При следующих вращениях, смещаемся на небольшой участок dx , как показано на рисунке 29.

Смещение реализуем, с помощью задержки работы датчика на время равное dx :

$$dx = \frac{T_{1\text{ об}}}{n} = \frac{0,42}{160} = 0,0026 \text{ с, или } 2,6 \text{ мс,} \quad (21)$$

где n – это количество точек необходимое для анализа.

При следующем вращении, повторяется сбор данных по отношению к сигналу отметчика со смещением на небольшой участок контролируемого объекта.

Рассчитаем пройденный путь dl диска за время задержки dx .

Линейная скорость точек на краю окружности диска составляет:

$$v = \frac{L}{T_{1\text{ об}}} = \frac{3,14 \cdot 6}{0,42} = 44,86 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (22)$$

где L – длина окружности.

Пройденный путь dl за время задержки dx :

$$dl = v \cdot dx = 44,86 \cdot 0,0026 = 0,12 \text{ м, или } 120 \text{ мм.} \quad (23)$$

Получаем задержку 2,6 мс, при одном вращении агрегата. Далее, для последующих вращений собирать данные с данной задержкой, смещаясь на путь dl равный 120 мм, при каждом новом обороте агрегата.

Для сбора данных со всей поверхности диска потребуется время равное:

$$t = T_{1\text{об}} \cdot n/4 = 0,42 \cdot 160/4 = 16,8 \text{ с.} \quad (24)$$

Скорость обновления данных равна 16,8 с. За это время датчик соберет данные о температуре со всей поверхности диска, при этом смещаясь на небольшой участок при каждом вращении.

Модель можно улучшить, собирая данные не одни раз за оборот, а позволяя системе собирать данные четыре раза.

При фиксации отметчиком одного оборота агрегата, в систему будет поступать четыре значения температуры от ИК датчиков. Система будет рассчитывать градиент среди четырех этих значений (разница между максимальным и минимальным значением). При следующих вращениях агрегата, рост градиента означает степень развития дефекта.

Для примера рассмотрим построение профиля тепловой энергии и температуры при использовании датчика D2. Построим поле тепловой энергии, которое представляет множество точек поверхности диска, причем, каждая точка выполнена с определенным смещением. Профиль представляет 40 кривых, где каждая следующая линия смещена друг от друга на dl , рисунок 30. Код программы представлен в приложении Б.

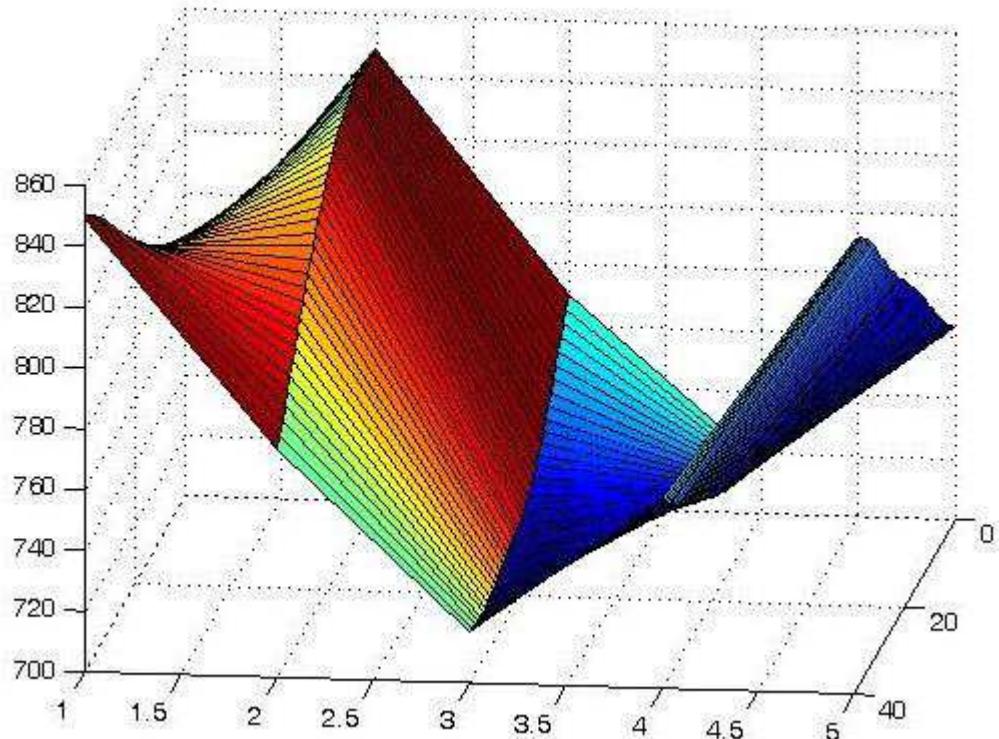


Рисунок 30 – Поле тепловой энергии

Построим поле температур, которое удалось получить с помощью датчика D2, рисунок 31.

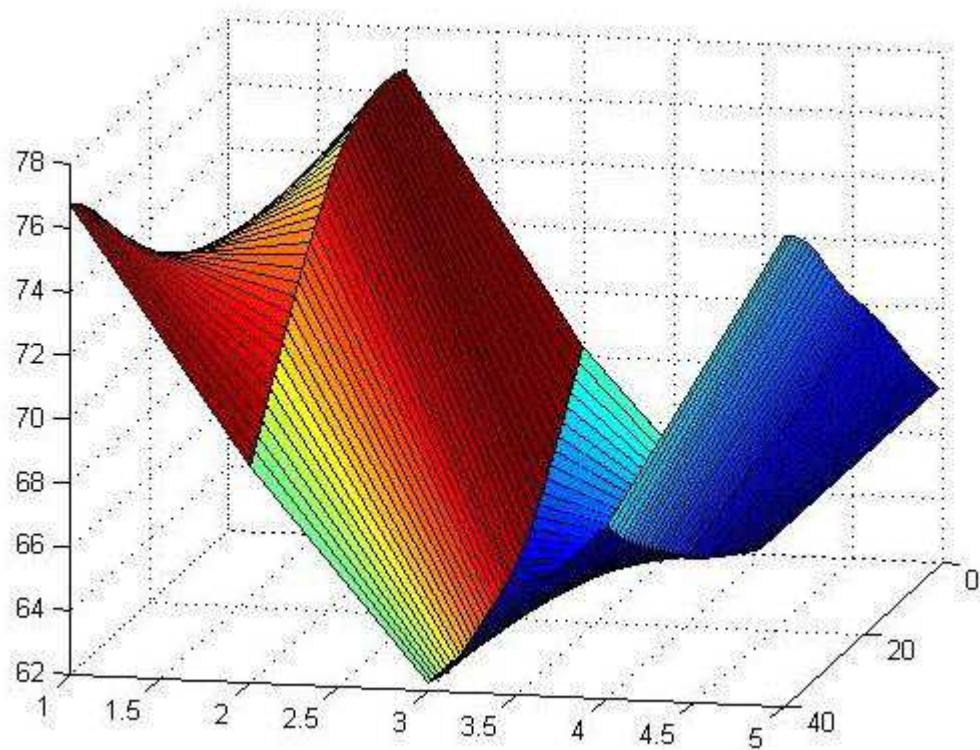


Рисунок 31 – Поле температур

Большой градиент температур, будет первым признаком дефекта на объекте контроля и поводом к необходимости принятия мер по его устранению.

Сравним градиент значения температур исходных данных с градиентом температуры, которая получилась при смещении.

Градиент температуры в исходных данных составляет:

$$grad_{\text{исх}} = 80,1 - 60,6 = 19,5 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Градиент температуры после обработки исходных данных с помощью ИК датчика со смещением:

$$grad_{\text{смеш}} = 76,71 - 62,21 = 14,5 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$\text{Ошибка } D2_{\text{смеш}} = 100 - \frac{14,5}{19,5} \cdot 100\% = 25\%.$$

Сравним полученные значения точности датчиков представленных в таблице 4.

Таблица 4 – Сравнения полученных данных датчиков

Датчик	T, макс. °C	T, мин. °C	grad, °C	Ошибка, %
Исх, дан	80,1	60,6	19,5	–
D1	78,36	61,1	17,26	11,49
D2	75,45	62,2	13,25	32
D2,смеш	76,71	62,21	14,5	25

Выводы: В результате смещения на небольшой участок при каждом вращении агрегата, удалось уменьшить ошибку (увеличить точность измерения).

Математические методы помогут улучшать точность измерений, но в данной работе не такой задачи не ставилось.

Так же есть возможность увеличить скорость сбора данных, за счет того, что известны участки минимальной и максимальной температуры, где и наблюдается участок с максимальным градиентом. То алгоритм можно подстроить под контроль над этими участками и раз в 30 секунд собирать данные по изменение профиля температуры, тем самым можно обеспечить высокую скорость сбора данных и реагировать на них.

В работе разработан алгоритм обработки сигналов, алгоритм работы системы контроля. Выбраны участки, по которым ведется контроль.

3.7 Методика диагностики причин повышения температуры

3.7.1 Применение алгоритма работы системы сбора данных по трем датчикам в подпятнике

Разработанная выше методика позволяет определять дефекты в подпятнике гидроагрегата. Однако, необходимо разработать алгоритмы работы системы к указанной методики.

С учетом того, что рост температуры строго регламентируется на всех главных узлах агрегата. К примеру, при повышении температуры поверхности диска подпятника на 5°C срабатывает предупредительная сигнализация, а при повышении температуры на 10°C происходит аварийный останов гидроагрегата [8].

Контролировать уплотнения подпятника будем по тем же условиям, которые описаны выше.

Для примера рассмотрим двухрядный подпятник гидроагрегата, рисунок 32.

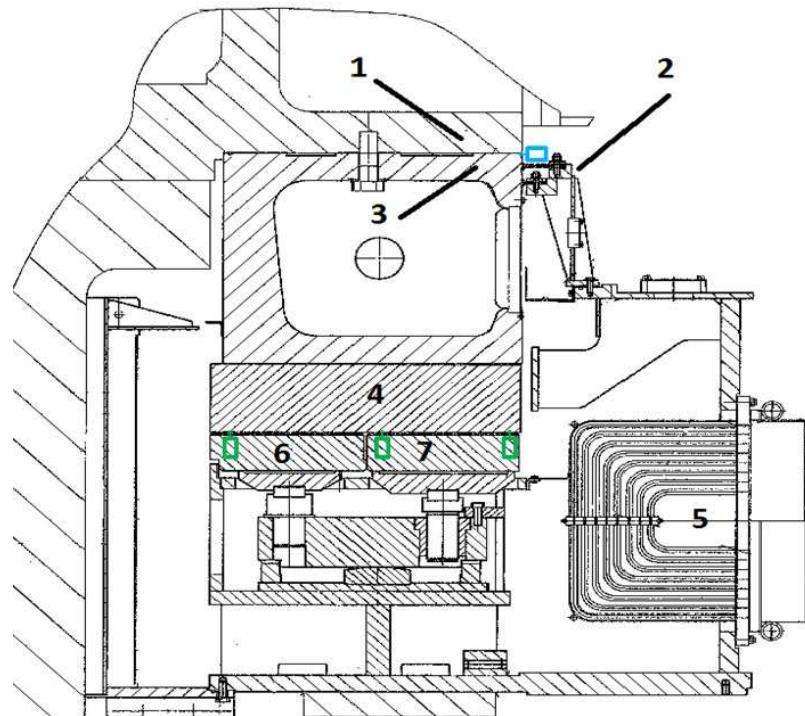


Рисунок 32- Расположение ИК датчиков

На рисунке 33 изображены 3 точки, которые соответствует расположениям ИК датчиков рисунка 32 в одном сечении.

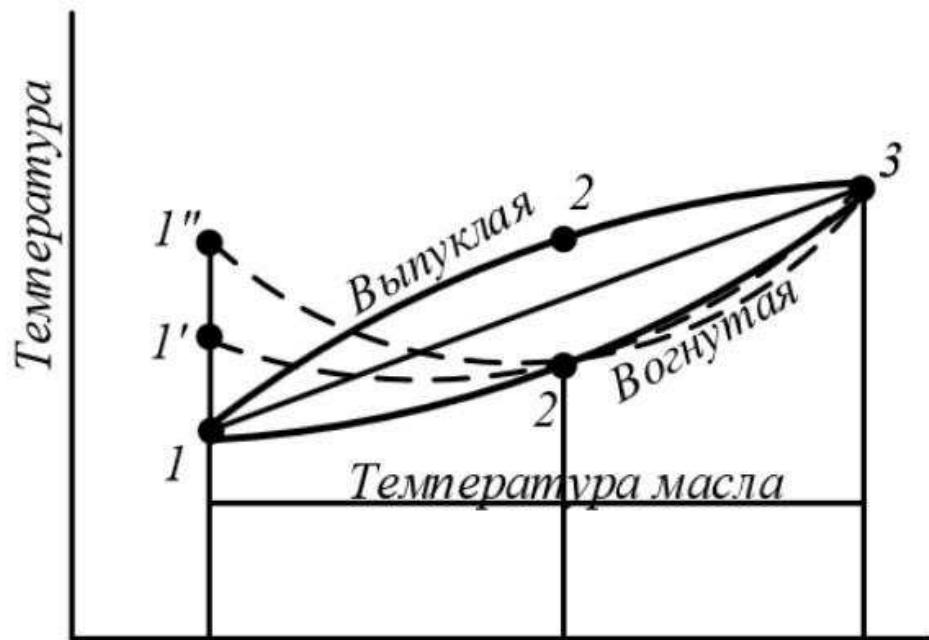


Рисунок 33 – Распределение температуры в под пятнике

Распределение температур может иметь вид: прямой, выпуклую и вогнутую линии.

Прямая линия означает, что ГА работает нормально.

Вогнутая – ГА работает нормально.

Выпуклая - с ГА что-то не так и необходимо применять меры.

Если температура масла равна температуре всех трех точек, то гидроагрегат остановлен.

Рассмотрим первый случай, когда линия вогнутая, рисунок 34.

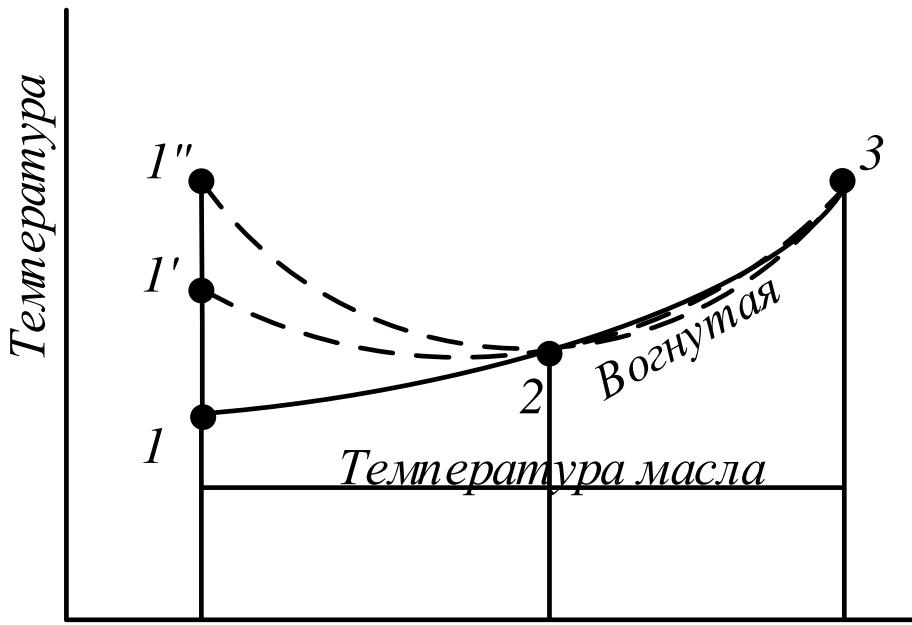


Рисунок 34 – Вогнутое распределение температуры диска

Вогнутая линия (1–2–3) соответствует нормальному распределению температур на поверхности диска под пятнико при установленном режиме работы агрегата.

Если температура распределяется, как вогнутая линия, начинающиеся из точки 1', то это говорит о малоразвитом дефекте, из-за наличия масляного голодаания сегментов. При этом срабатывает предупредительная сигнализация. Если распределение температуры начинается из точки 1'', то это означает сильно развитый дефект из-за большого масляного голодаания сегментов. Здесь уже срабатывает аварийная команда на останов агрегата.

Рассмотрим второй случай, когда линия выпуклая, рисунок 35.

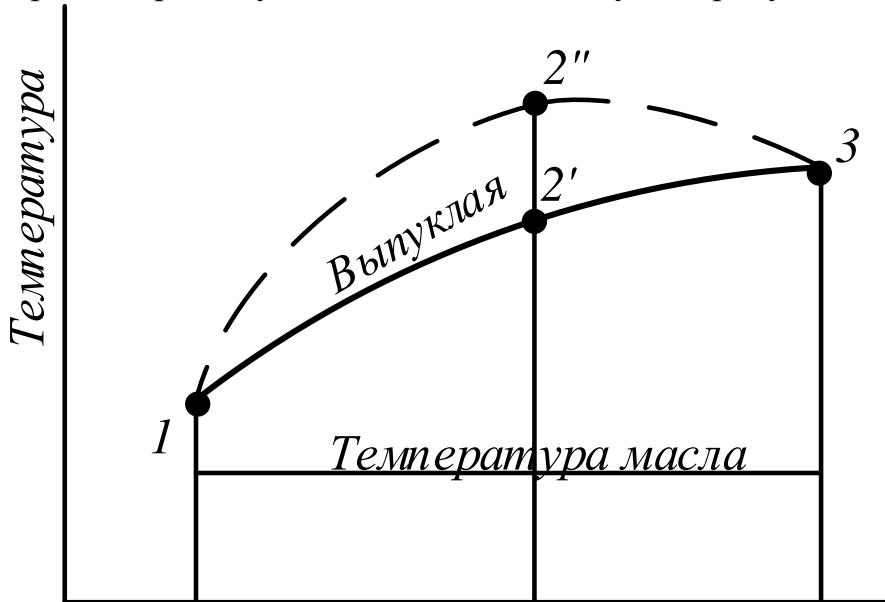


Рисунок 35 – Выпуклое распределение температуры диска

Выпуклая линия (1–2'–3) соответствует ненормальному распределению температур на поверхности диске подпятника при установившемся режиме работы агрегата. Так как температура в середине диска подпятника равна или близка температуре внешней стороны диска, а это означает, что сегменты подвисают, является малоразвитым дефектом. В таком случае срабатывает предупредительная сигнализация.

В случае если температура в середине выше чем на внешней стороне, которой соответствует распределение (1–2''–3), то это является сильно развитым дефектом, в результате сильного подвигания сегментов. Здесь уже срабатывает аварийная команда на останов агрегата.

Рассмотрим случай когда температуры в центре снижается до температуры масла. Линия (1–2'–3), говорит о малоразвитом дефекте связанного с подвиганием сегмента в центре подпятника. Выдается предупредительная сигнализация. Линия (1–2''–3), говорит о сильно развитом дефекте подвигания сегментов в центре подпятника. Здесь уже срабатывает аварийная команда на останов агрегата, рисунок 36.

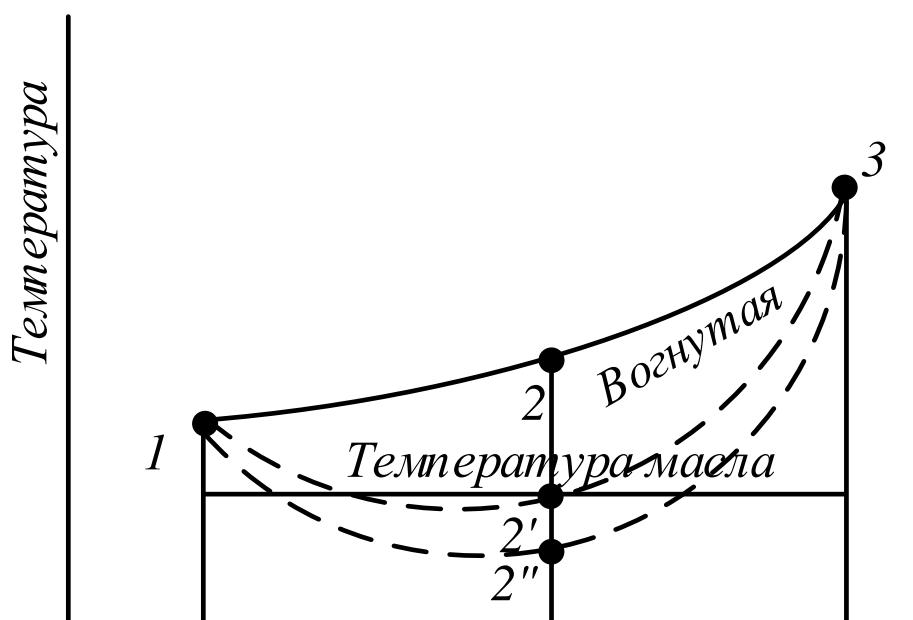


Рисунок 36 – Снижение температуры в центре подпятника

В случае, когда повышается температура всех точек на 3 - 4 °С при сохранении температуры масла на прежнем уровне является признаком ухудшения состояния поверхностей трения, линия (1'-2'-3'). При этом случае срабатывает предупредительная сигнализация.

Если увеличение температуры продолжает расти, при сохранении температуры масла на прежнем уровне, то это свидетельствуют о развивающемся повреждении фторопластовой поверхности сегментов, линия (1''–2''–3''). Здесь уже срабатывает аварийная команда на останов агрегата, рисунок 37.

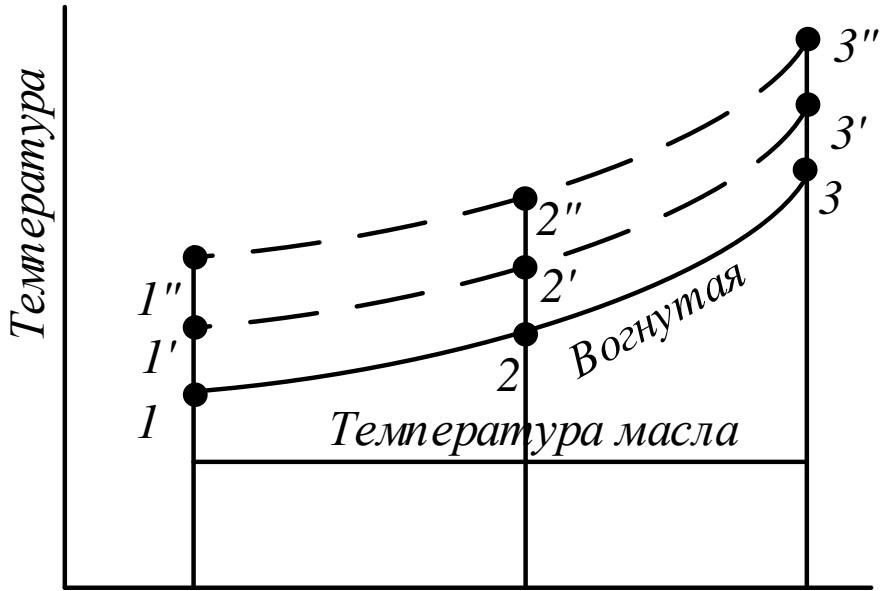


Рисунок 37 – Рост температуры всех точек

Если понижается температура одного или нескольких сегментов подпятника на жесткой винтовой опоре до значений, близких к температуре масла в ванне (при исправности термоконтроля), свидетельствует о разгрузке этих сегментов, которая может произойти в результате значительных смятий опорных элементов или их разрушений (например, разрушений тарельчатых опор). В подпятнике с ЭМП-сегментами это может произойти также за счет истирания фторопласта на рабочей поверхности этих сегментов [5].

В случае, когда понижается температура всех точек линия (1'-2'-3'), то это является признаком мало развитого дефекта разрушения опорных элементов. При этом срабатывает предупредительная сигнализация.

Если продолжается понижение температуры линия (1''-2''-3''), то это свидетельствуют о сильно развитом дефекте разрушения опорных элементов подпятника. Здесь уже срабатывает аварийная команда на останов агрегата, рисунок 38.

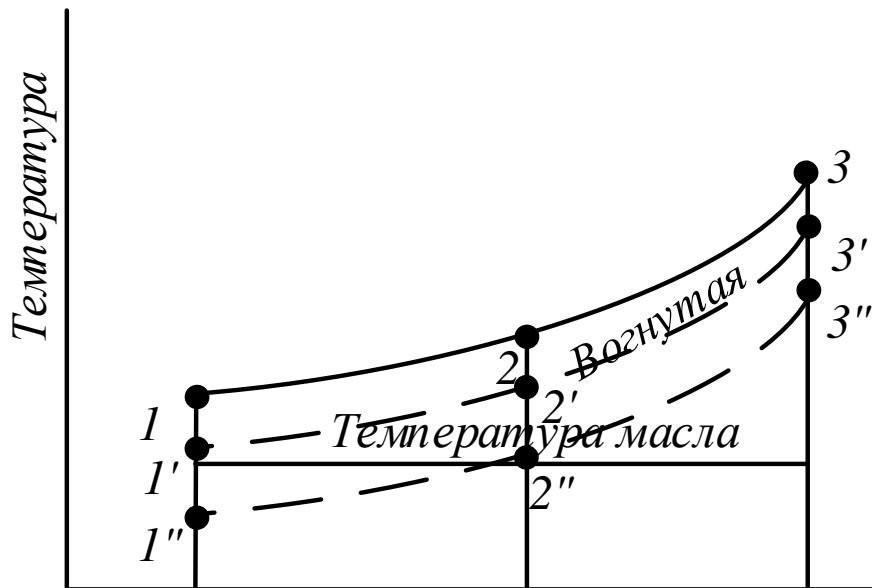


Рисунок 38 – Понижение температуры диска до температуры масла

Если во время работы гидроагрегата температура диска подпяника повышается или понижается, то происходит предупреждение и останов агрегата по 1 из очек точки.

Размещение датчиков по основным частям агрегата представлена в приложении В.

Так же можно отметить следующие критерии:

1. Температура масла больше любой точки поверхности трения, вероятная причина – неисправность датчика (ИК или температуры масла).
2. Температура в центре больше чем внешняя означает, что сегменты подвисают, увеличивается трение по внутренней стороне.
3. Температура поверхности трения ниже температуры масла или эти температуры равны, означает признак подвисания сегментов.
4. Повышение температуры крайних точек, говорит о маслянном голодании сегментов.
5. В случае если температура сегментов подпятника уменьшилась до температуры масла в ванне, это четко указывает на потерю соприкосновения с зеркалом пятнышки в следствии разрушения его опоры (тарелки). Необходимо наблюдать как за ростом температуры, так и за её снижением [2, с. 210].

3.8 Вывод

Разрабатываемый метод позволяет:

1. осуществлять контроль температуры важных вращающихся объектов (вал, диск пятнышки, полюса ротора генератора);
2. применять не дорогие датчики, что позволяет обеспечить контроль с малыми затратами;
3. еще на этапе развития дефектов предпринять меры по их устранению.

Разрабатываемый метод не требует останова гидроагрегата для повторной оценки его состояния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы, доказана большая значимость и практическое применение инфракрасных датчиков температуры. С помощью них можно контролировать: трение в подшипниках, уплотнения подшипников, трение в подпятнике, уплотнения подпятника, уплотнение вала, ротор генератора, контактные кольца щеточного аппарата. Большой градиент температур полученных от ИК датчиков, укажет на наличие дефекта, а разработанные диагностические правила позволят определить его стадию. Раннее выявление дефектов в момент их развития позволит не допустить процессов с изменением жесткости и деформаций.

Контроль и мониторинг нагрева вращающихся частей гидроагрегата может значительно продлить срок службы узлов и элементов трения.

В настоящий момент существуют датчики позволяющие осуществлять контроль вращающихся частей агрегата. Однако, нет методики и алгоритмов, позволяющих собирать и анализировать соответствующие данные. В данной работе, на конкретном примере проанализированы методы, позволяющие собирать данные и проводить оценку исправности соответствующих вращающихся частей.

Инфракрасные датчики температуры можно использовать в случаях:

- оперативного измерения температуры;
- особого контроля параметров нагревания определенного механизма из-за важности технологического процесса;
- контроля температуры движущегося объекта;
- идентификация нагревания в труднодоступном месте или деталях, находящихся на значительном удалении. Диагностировать параметры с необходимой точностью и на расстоянии.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВГП – верхний генераторный подшипник;

ГП – генераторный подшипник;

ГТ – гидротурбина;

ГЭС – гидроэлектростанция;

ГА – гидроагрегат;

ИК – инфракрасный;

НГП – нижний генераторный подшипник;

ССД – система сбора данных;

ТП – турбинный подшипник.

ЭМП- эластичных металлопластмассовых

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Владиславлев, Л.А. Вибрация гидроагрегатов гидроэлектрический станций: учебник /Л.А.Владиславлев.- Москва: Энергия, 1972. – 3, 4, 5, 21, 30, 33, 143, 148 с.
2. Александров, А.Е. Подшипники гидроагрегатов: учебник /А.Е.Александров. - Москва: Энергия, 1975. – 14, 96, 144, 160, 167, 210, 223, 224 с.
3. Михайлов, М.Г. Непредусмотренные ситуации при использовании комплексных проектов гидроэлектростанций: учебное пособие / М.Г.Михайлов. - Санкт-Петербург, 2011. – 118,137, 210 с.
4. Александров, А.Е. Анализ работы подпятников гидроагрегатов с ЭМП-сегментами / А.Е. Александров // Гидротехническое строительство. – 2011.- №4.- С. 8-11.
5. СТО 17330282.27.140.001 – 2006 Методика оценки технического состояния основного оборудования гидроэлектростанций. – Введ. 01.08.2006. – Москва, 2006. – 47 с.
6. Михайлов, М.Г. Нештатные ситуации, возникающие на гидроэлектростанциях в России и за рубежом / М.Г. Михайлов // Гидротехническое строительство. - 2017. - №2. – С. 25.
7. Михайлов М.Г. Нештатные ситуации, возникающие при монтаже, пусконаладке, эксплуатации, и натурных испытаний технологического оборудования / М.Г. Михайлов // Гидротехническое строительство. 2017.-№5. – С. 49, 50.
8. Гортышев, Ю.Ф. Теория и техника теплофизического эксперимента: учебник /Ю.Ф. Гортышев. – Москва: Энергоатомиздат, 2009. – 185, 189,190 с.
9. Применение цифрового инфракрасного термометра (пиromетра) для контроля температуры узлов [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.electrosad.ru/Jurnal/pirometr.htm>
10. Показатель визирования пиromетра [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.astena.ru/vizir.html>
11. Иванова, Г.М. Теплотехнические измерения и приборы: учебник / Г.М. Иванова. – Москва: Энергоатомиздат, 2007. – 76, 78, 80 с.
12. Карманное практическое руководство по термографии [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.ntcexpert.ru/documents/teplovizory/Prakticheskoe-rukovodstvo-po-promishlennoy-termografii.pdf>
13. Принципы работы пирометров Optic [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.izmerimvse.ua/Statya_Principi_raboti_pirometrov_Optris.aspx
14. Расчет температуры нагрева поверхности пильного диска при осуществлении пирометрического контроля [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20245984>
15. Повышение устойчивости круглых пил регулированием температурного перепада по радиусу диска [Электронный ресурс]. - Режим

доступа: <http://www.docme.ru/doc/1412230/povyshenie-ustojchivosti-kruglyh-pil-regulirovaniem-tempera>

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Код программы

```
clc;
clear all;
%исходные данные
T=[63.9, 65.3, 68.5, 68, 76.3, 76.6, 80.1, 75.6, 73.6, 66.4, 65.3, 60.6, 61.6,
63.3, 62.2, 63.1 63.9];
x=[0, 1177.5, 2355, 3532.5, 4710, 5887.5, 7065, 8242.5, 9420 10597.5 11775,
12952.5, 14130, 15307.5, 16485, 17662.5 18840];
plot(x,T,'o-');%исходный график
xlabel('Длина диска, мм');
ylabel('Температура, °C');
title('Исходные данные');
N=length(T);%объем исходных данных
n=10;%число "маленьких" отрезков внутри интервала исходных данных
k=(N-1)*n+1;%количество точек в новом массиве
newX=zeros([1 k]); %резервируем память
newT=zeros([1 k]); %под новые массивы
newX(1)=x(1);newT(1)=T(1); %начальная пара значений
for i=2:N %цикл по исходным данным
    %определяем длину шагов по переменным Т, x
    ht=(T(i)-T(i-1))/n;
    hx=(x(i)-x(i-1))/n;
    for j=1:n %"строим" маленькие отрезки
        ind=n*(i-2)+j+1;%определяем индекс элемента в новых массивах
        newT(ind)=newT(ind-1)+ht;%делаем шаг по Т
        newX(ind)=newX(ind-1)+hx;%аналогично по X
    end;
end;
figure;%в новом окне
plot(newX,newT,'o-');%новый график
xlabel('Длина диска, мм');
ylabel('Температура, °C');
%dополнение к коду
q=5.67*10.^-8;%Bt/(m^2K^4) постоянная Стефана-Больцмана
k=length(newX);
Em= zeros ([1 k]);%память под значения тепла
for i=1:k
    Em(i)=q* (newT(i)+273.15)^4;
end
figure;
plot(newX,Em,'o-');
xlabel('Длина диска, мм');
ylabel('Энергетическая светимость, Вт/м ^2');
%вычисляем среднеквадратичные значения
Xkv=zeros ([1 N-1]);%значение X для графика
Ekv=zeros ([1 N-1]);%средневадратичное значение Е
Tkv=zeros ([1 N-1]);%средневадратичное значение Т
for i=2:N %цикл по числу отрезков
    sumE=0;%для подсчета суммы квадратов
    for j=1:n+1 %цикл по маленьким отрезкам (9 внутренних +2 конца отрезка)
        ind2=n*(i-2)+j;% индекс элемента в "больших" массивах
        sumE=sumE+Em(ind2).^2;
    end;
    Ekv(i-1)=(sumE/(n+1)).^(0.5);%вычисляем среднеквадратичное значение на отрезке
    Tkv(i-1)=(Ekv(i-1)/q).^(0.25)-273.15;%соответствующее знаечние Т
    Xkv(i-1)=(x(i)+x(i-1))/2;%для метки графика берем середину отрезка X
end;
figure;%в новом окне
plot(Xkv,Ekv,'o-');%график среднеквадратичных значений Е
xlabel('Длина диска, мм');
ylabel('Энергетическая светимость, Вт/м ^2');
figure;%в новом окне
plot(Xkv,Tkv,'o-');% значения Т
xlabel('Длина диска, мм');
ylabel('Температура, °C');
figure;%в новом окне
```

```

plot(x,T,Xkv,Tkv,'o-');% значения
T=[63.9, 65.3, 68.5, 68, 76.3, 76.6, 80.1, 75.6, 73.6, 66.4, 65.3, 60.6, 61.6,
63.3, 62.2, 63.1 63.9];
x=[0, 1177.5, 2355, 3532.5, 4710, 5887.5, 7065, 8242.5, 9420 10597.5 11775,
12952.5, 14130, 15307.5, 16485, 17662.5 18840];
plot(x,T,'o-');%исходный график
xlim([x(1) x(end)]);
title('Исходные данные');
P=length(T);
n=10;%число "маленьких" отрезков внутри интервала исходных данных
k=P*n-11;%количество точек в новом массиве
T2=zeros([1 k]);
x2=zeros([1 k]);
T2(1)=T(1);
x2(1)=x(1);

for i=2:P
    %определяем длину шагов по переменным T,x
    dt=(T(i)-T(i-1))/n;
    dx=(x(i)-x(i-1))/n;
    for j=1:n
        ind=n*(i-2)+j+1;
        T2(ind)=T2(ind-1)+dt;
        x2(ind)=x2(ind-1)+dx;
    end;
end;
figure;
plot(x2,T2,'o-');
xlim([x2(1) x2(end)]);
q=5.67*10.^-8;%Вт/(м^2К^4) постоянная Стефана-Больцмана
k=length(x2);
E2= zeros ([1 k]);
E2(1)=E2(i);
for i=1:k

    E2(i)=q*(T2(i)+273.15)^4;
end;
figure;
plot(x2,E2,'o-');
xlim([x2(1) x2(end)]);
p2=5;
n2=40;
%вычисляем среднеквадратичные значения
Xkv=zeros ([p2 n2]);
%Ekv=zeros ([p2 n2]);%средневадратичное значение Е
%Tkv=zeros ([p2 n2]);
Xkv2=zeros ([1 p2]);
Ekv2=zeros ([1 p2]);%средневадратичное значение Е
Tkv2=zeros ([1 p2]);
dx=(x(5)- x(1));
Xkv2(1)=0;
for i=1:p2 %цикл по числу отрезков i=1
    sumE=0;

    for j=1:n2
        ind2=(n2-10)*(i-1)+j; % i=1 ind=j

        sumE=sumE+E2(ind2).^2;
    end;

    Ekv2(i)=(sumE/(n2)).^(0.5);%вычисляем среднеквадратичное значение на отрезке
    Tkv2(i)=(Ekv2(i)/q).^(0.25)-273.15;%соответствующее значение Т
if i<p2
    Xkv2(i+1)=(Xkv2(i)+dx);
end;
end;
figure;
plot(Xkv2,Ekv2,'o-');
xlim([Xkv2(1) Xkv2(end)]);

```

```
figure;
plot(Xkv2,Tkv2,'o-');
xlim([Xkv2(1) Xkv2(end)]);
figure;
plot(x,T,Xkv2,Tkv2,'o-');
xlim([Xkv2(1) Xkv2(end)]);
a = min( Tkv(:) );
b= max ( Tkv(:) );
plot(x,T,Xkv,Tkv,Xkv2,Tkv2,'o-');
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Код программы

```
%исходные данные
T=[63.9, 65.3, 68.5, 68, 76.3, 76.6, 80.1, 75.6, 73.6, 66.4, 65.3, 60.6, 61.6,
63.3, 62.2, 63.1 63.9];
x=[0, 1177.5, 2355, 3532.5, 4710, 5887.5, 7065, 8242.5, 9420 10597.5 11775,
12952.5, 14130, 15307.5, 16485, 17662.5 18840];
plot(x,T,'o-');%исходный график
title('Исходные данные');
P=length(T);
n=10;%число "маленьких" отрезков внутри интервала исходных данных
k1=P*n-10;%количество точек в новом массиве
T2=zeros([1 k1]);
x2=zeros([1 k1]);
T2(1)=T(1);
x2(1)=x(1);
for i=2:P
    %определяем длину шагов по переменным T,x
    dt=(T(i)-T(i-1))/n;
    dx=(x(i)-x(i-1))/n;
    for j=1:n
        ind=n*(i-2)+j+1;
        T2(ind)=T2(ind-1)+dt;
        x2(ind)=x2(ind-1)+dx;
    end;
end;
figure;
plot(x2,T2,'o-');
q=5.67*10.^-8;%Bt/(m^2K^4) постоянная Стефана-Больцмона
k=160;%length(x2);
E2= zeros ([1 k]);
x22= zeros ([1 k]);
for i=1:k
    E2(i)=q*(T2(i)+273.15)^4;
    x22(i)=x2(i);
end
figure;
plot(x22,E2,'o-');
p2=5;
n2=40;
Xkv=zeros ([1 p2]);
Ekv=zeros ([1 p2]);%средневадратичное значение Е
Tkv=zeros ([1 p2]);
Mass_Ekv =zeros ([p2 n2, p2 n2,n2]); % X, Ekv, номер точки
Mass_Tkv =zeros ([p2 n2, p2 n2,n2]); % X, Tkv, номер точки
dx=(x(5)-x(1));% помни что здесь у тебя dx рассчитан на 40 точек
for k=1:n2 % номер точки бежит цикл от 0 до 40

    for i=1:p2 %цикл по числу отрезков i=1

        sumE=0;
        if i<6
        for j=1:n2

            ind2=(n2)*(i-1)+j+k; % i=1 ind=j
            if ind2>160
            sumE=sumE+E2(ind2-160).^2;
            end;

            if ind2<=160

                sumE=sumE+E2(ind2).^2;
            end;
            end;
        end;
    end;
end;
```

```

Ekv(i,k)=(sumE/(n2)).^(0.5);%вычисляем среднеквадратичное значение на отрезке
Tkv(i)=(Ekv(i,k)/q).^(0.25)-273.15;%соответствующее знаечние Т
if i<p2
Xkv(i+1)=(Xkv(i)+dx);
end
end;
end;
z=[];
for i=1:p2;
    for j=1:n2;
z(i,j)=(Ekv(i,k));
    end
end
figure;
surf(Ekv);
figure;
plot(Xkv,Tkv,'o-');
Y1=max(T);
Y2=min(T);
grad1=Y1-Y2;
Y11=max(Tkv);
Y22=min(Tkv);
grad11=Y11-Y22;

```

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Места установки ИК датчиков

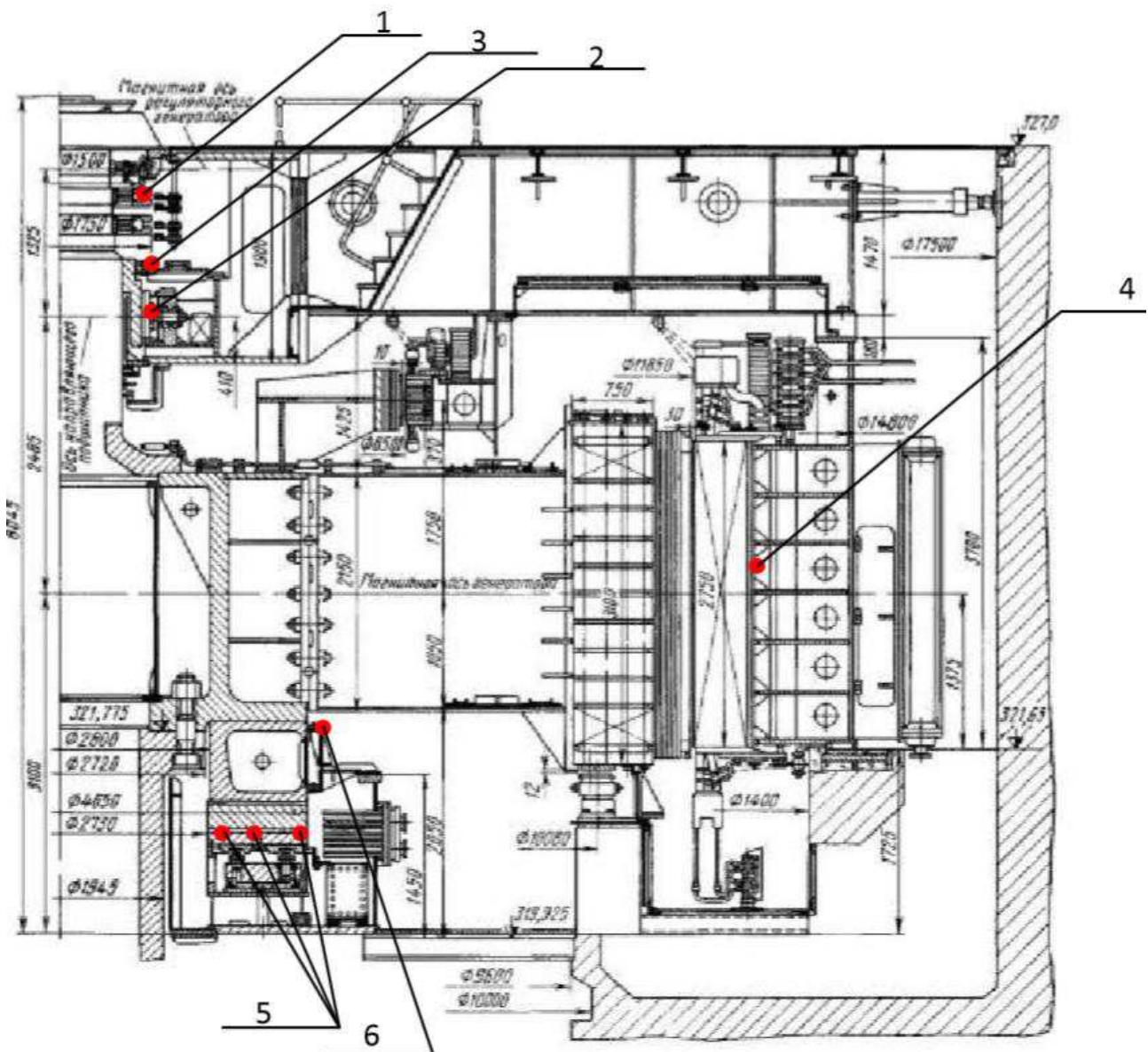


Рисунок В.1 – Генераторный узел:
точка 1 контролируем нагрев контактных колец;
точка 2 генераторный подшипник;
точка 3 уплотнение генераторного подшипника;
точка 4 полюса ротора; точка 5 диск подпятника;
точка 6 уплотнение подпятника

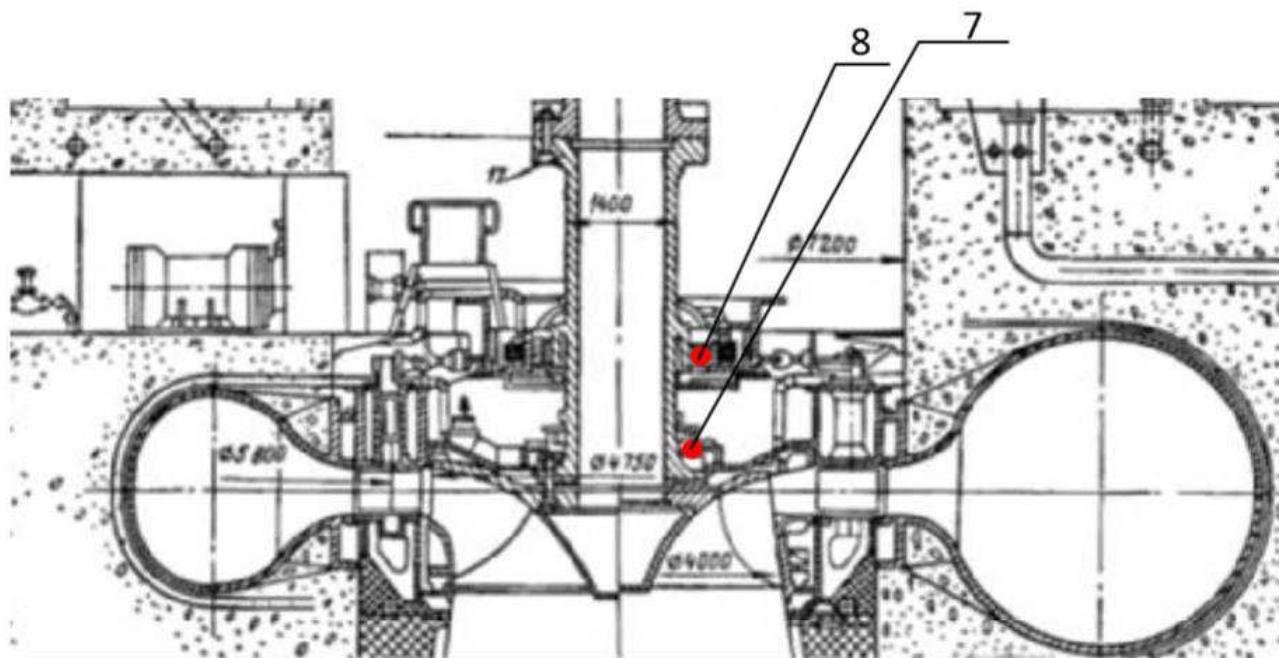


Рисунок В.2 – Турбинный узел:
точка 7 уплотнение вала; точка 8 турбинный подшипник

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
САЯНО-ШУШЕНСКИЙ ФИЛИАЛ

Кафедра «Гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических систем и электрических сетей»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

И.Ю. Покладчиков
подпись инициалы, фамилия

15 06 2018 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЧАСТЕЙ
ГИДРОАГРЕГАТА ГЭС**

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

13.04.02.06 Гидроэлектростанции

Научный
руководитель *Д.А. Камп*
подпись, дата

Ведущий инженер по наладке и
испытаниям СМО филиала ПАО
«РусГидро» - «Саяно-Шушенская»
должность

К.А. Демин
подпись, фамилия

Выпускник *Илья*
подпись, дата

О.С. Иванов
подпись, фамилия

Рецензент *С.С. Соловьев*
подпись, дата

М.А. Ананьев
подпись, фамилия

Нормоконтролер *Чебанова А.А.*
подпись, дата

А.А. Чебанова
подпись, фамилия