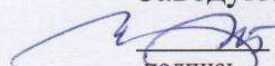


Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
САЯНО-ШУШЕНСКИЙ ФИЛИАЛ

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

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 И.Ю. Погоняйченко

подпись инициалы, фамилия

« 15 » 06 2018 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СИЛОВЫХ
ТРАНСФОРМАТОРОВ САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС**

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

13.04.02.06 Гидроэлектростанции

Научный
руководитель

 14.06.18
подпись, дата

Инженер по наладке и
испытаниям
Филиала ПАО «РусГидро»
«Саяно-Шушенская ГЭС
имени П.С. Непорожного»
должность

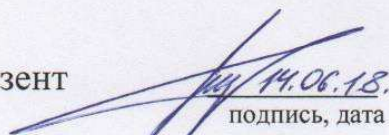
Н.А. Иванов
инициалы, фамилия

Выпускник

 14.06.18
подпись, дата

М.Ю. Мальцева
инициалы, фамилия

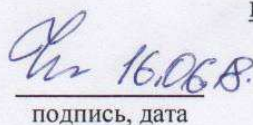
Рецензент

 14.06.18.
подпись, дата

Ведущий инженер по
наладке и испытаниям
Филиала ПАО «РусГидро»
«Саяно-Шушенская ГЭС
имени П.С. Непорожного»
должность

А.Е. Беззубенко
инициалы, фамилия

Нормоконтролёр

 16.06.18.
подпись, дата

А.А. Чабанова
инициалы, фамилия

Саяногорск, Черемушки 2018

АННОТАЦИЯ

к магистерской диссертации Мальцевой Марины Юрьевны, студента 2 курса магистратуры Саяно – Шушенского филиала Сибирского федерального университета на тему «Автоматизация системы охлаждения силовых трансформаторов Саяно – Шушенской ГЭС».

В процессе выполнения работы было изучено ведение температурного режима трансформаторов СШГЭС типа ОРЦ-533000/500-У1 на сегодняшний день. Проведен анализ устройства и принципов действия различных типов систем охлаждения.

В работе проведены исследования в области электротехники и теплотехники, проанализированы основные процессы, проходящие в трансформаторе, маслоохладителях системы охлаждения, в системе технического водоснабжения. По результатам выполненных исследований разработана методика по порядку расчета необходимого расхода охлаждающей воды в зависимости от мощности трансформатора, температуры верхних слоёв масла, температуры охлаждающей воды.

Методика, ориентированная на увеличение или уменьшения интенсивности охлаждения трансформатора не по факту изменения температуры масла в верхних слоях, а с воздействием по возмущению, по факту изменения мощности трансформатора, может быть использована не только для трансформаторов СШГЭС, но и для трансформаторов имеющих такой же вид системы охлаждения на других гидроэлектростанциях РусГидро, а также в сетевых компаниях.

Ключевые слова: система охлаждения; трансформатор; ГЭС; тепловой контроль; система мониторинга.

АВТОРЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа в форме магистерской диссертации на тему «Автоматизация системы охлаждения силовых трансформаторов Саяно– Шушенской ГЭС» содержит 64 страницы основного текста, 20 рисунков, 9 таблиц, список использованных источников из 25 наименований.

Актуальность: Многолетний опыт эксплуатации блочных трансформаторов показал, что на ведение температурного режима трансформаторов персоналу приходится тратить достаточно много рабочего времени. Аварийные ситуации на станции, чрезмерная загрузка персонала, отсутствие опыта, а порой, и халатность могут привести или к чрезмерному перегреву, или охлаждению масла в трансформаторах из-за отсутствия контроля за температурным режимом.

Низкая температура масла верхних слоёв не желательна, а порой и не допускается из-за увеличения вязкости трансформаторного масла, что отражается на способности масла отводить тепло. Это в первую очередь объясняется уменьшением скорости циркуляции масла. Низкая температура масла отрицательно влияет на режим работы электродвигателей маслонасосов системы охлаждения, которые при низких температурах масла начинают работать с перегрузкой и быстро выходят из строя, что в итоге снижает надёжность трансформаторов.

Высокая температура верхних слоёв масла не допускается НТД и заводской инструкцией, она ограничивается величиной 70 °С. Работа с температурой верхних слоёв масла близкой к максимальной не рекомендуется из-за опасности перегрева.

Объект исследования: Филиал ПАО «РусГидро» – Саяно–Шушенская ГЭС имени П.С. Непорожного

Предмет исследования: система охлаждения трансформаторов ОРЦ 533000/500 У1.

Цель работы: разработка методики регулирования температуры верхних слоёв масла трансформатора при изменениях его нагрузки за счёт изменения расхода охлаждающей воды через теплообменники.

Задачи:

- анализ существующего положения ведения температурного режима трансформаторов СШГЭС типа ОРЦ-533000/500-У1 имеющие систему охлаждения типа OFWF (Ц);
- разработка методики расчёта потерь при работе трансформатора;
- разработка методики расчёта определения количества тепла отводимого с поверхности бака трансформатора в зависимости от потерь трансформатора;
- разработка методики расчёта для определения необходимого расхода воды через маслоохладитель для поддержания необходимой температуры верхних слоёв масла;

- разработка алгоритма проведения расчёта, необходимого расхода воды через маслоохладитель, в зависимости от нагрузки трансформатора для поддержания необходимой температуры верхних слоёв масла;

разработка алгоритма определения необходимого угла открытия дисковых затворов для требуемого расхода.

Методы исследования: анализ, синтез, классификация, обобщение, системный подход, структурно-функциональный метод, сравнение.

Научная новизна: разработка методики автоматизации системы охлаждения силовых трансформаторов ОРЦ 533000/500 У1 с помощью регулирования по возмущению — это регулирование с опережением, при котором прогнозируется ожидаемое изменение температуры масла в трансформаторе в результате изменения мощности трансформатора и принимаются меры прежде, чем это изменение температуры происходит.

Практическая ценность:

- Исключение работы трансформаторов в режиме перегрева;
- Увеличение срока службы трансформаторов;
- Уменьшение количества отключений трансформаторов;
- Повышение устойчивости энергосистемы.

Апробация работы: основные положения и результаты магистерской диссертации докладывались и обсуждались на:

- 1) VIII Всероссийском конкурсе студенческих проектов по гидроэнергетике «Энергия Развития», г. Москва, 2017 год;
- 2) IV Всероссийской научно – практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов «Гидроэлектростанции в XXI веке», г. Саяногорск р.п. Черемушки, 2017 год;
- 3) V Всероссийской научно – практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов «Гидроэлектростанции в XXI веке», г. Саяногорск р.п. Черемушки, 2018 год.

Публикации:

По результатам диссертационного исследования опубликовано 2 работы.

Структура работы: работа состоит из аннотации, автореферата, трех глав, заключения, списка использованных источников. Приложений А, Б, В.

ABSTRACT

Graduation qualification work in the form of a magician dissertation on the topic "Automation of the cooling system for power transformers of Sayano-Shushenskaya HPP" contains 64 pages of the main text, 20 drawings, 9 tables, a list of 25 sources used from the names.

Relevance: Long-term experience in the operation of block transformers has shown that personnel have to spend a lot of time working on maintaining the temperature regime of transformers. Emergency situations at the station, excessive personnel loading, lack of experience, and sometimes negligence can result either in excessive overheating or in oil cooling in transformers due to lack of control over the temperature regime.

Low temperature of the oil of the upper layers is not desirable, and sometimes it is not allowed because of the increase in the viscosity of the transformer oil, which affects the ability of the oil to remove heat.

This is primarily due to a decrease in the rate of oil circulation. Low oil temperature negatively affects the operating mode of electric motors of oil coolers of the cooling system, which, at low oil temperatures, begin to work with overload and quickly fail, which ultimately reduces the reliability of the transformers.

The high temperature of the upper oil layers is not allowed by NTD and factory instructions, it is limited to 70 ° C. Working with the temperature of the upper layers of oil close to the maximum is not recommended because of the danger of overheating.

Object of the study: Filial PJSC "RusHydro" - Sayano-Shushenskaya HPP named after P.S. Non-empty

Research subject: cooling system for transformers ORC 533000/500 U1.

The purpose of the work: development of a procedure for controlling the temperature of the upper layers of the transformer oil with changes in its load due to a change in the flow of cooling water through heat exchangers.

Tasks:

- Analysis of the existing temperature control conditions of SSHPP type transformers of the ORC-533000/500-U1 type with the OFWF (C) cooling system;
 - development of a technique for calculating losses during the operation of the transformer;
 - development of a methodology for calculating the amount of heat of a transformer withdrawn from the tank surface, depending on the transformer's losses;
 - development of a calculation procedure for determining the required water flow through the oil cooler to maintain the required temperature of the upper oil layers;
 - development of an algorithm for calculating the required water flow through the oil cooler, depending on the load of the transformer to maintain the required temperature of the upper oil layers;
- development of the algorithm for determining the required opening angle of the butterfly valves for the required flow rate.

Research methods: analysis, synthesis, classification, generalization, system approach, structural-functional method, comparison.

Scientific novelty: the development of the methodology for automation of the cooling system of power transformers ORC 533000/500 U1 by means of regulation by the disturbance is an advanced control in which the expected change in the oil temperature in the transformer is predicted as a result of a change in the transformer power and measures are taken before this temperature change occurs .

Practical value:

- Exclusion of the operation of transformers in overheating mode;
- Longer service life of transformers;
- Reducing the number of transformer shutdowns;
- Improving the sustainability of the energy system.

Approbation of work: the main provisions and results of the master's thesis were reported and discussed at:

1) VIII All-Russian competition of student projects on hydropower "Development Energy", Moscow, 2017;

2) IV All - Russian scientific - practical conference of young scientists, specialists, graduate students and a student of "Hydroelectric power stations in the XXI century", Sayanogorsk r.p. Cheryomushki, 2017;

3) V All - Russian scientific - practical conference of young scientists, specialists, graduate students and students of the "Hydroelectric power station in the XXI century", Sayanogorsk r.p. Cheryomushki, 2018 year.

Publications:

According to the results of the thesis, 2 papers were published.

Structure of work: the work consists of an abstract, an abstract, three chapters, conclusion, a list of sources used. Appendices A, B, and B.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общая часть.....	8
1.1 Анализ необходимости автоматизации.....	8
1.2 Трансформаторы с охлаждением типа «Ц»	9
1.3 Методология тепловыделения и теплоотдачи в трансформаторе.....	12
2. Оценка технического состояния трансформаторного оборудования.....	16
2.1 Расчет тепловыделения в трансформаторе ОРЦ-533000/500 У1.....	16
2.2 Оценка технического состояния трансформаторного оборудования	16
2.3 Система мониторинга трансформаторного оборудования.....	18
2.3.1 Контроль теплового состояния.....	18
2.3.2 Контроль газосодержания и влагосодержания масла.....	19
2.3.3 Контроль состояния высоковольтных вводов.....	22
2.4 Расчет остаточного ресурса трансформаторов.....	26
2.5 Алгоритм расчета остаточного ресурса трансформатора.....	27
3. Разработка автоматизации системы охлаждения трансформаторов ОРЦ 533000/500 У1 СШГЭС.....	31
3.1 Расчет потери энергии.....	31
3.2 Расчет охлаждения трансформатора ОРЦ-533000/500 У1.....	34
3.3 Расчет экономического ущерба при перегреве трансформатора.....	56
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	58
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	59
ПРИЛОЖЕНИЕ А Алгоритм расчета остаточного ресурса трансформатора	60
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Структурная схема охлаждения трансформатора.....	61
ПРИЛОЖЕНИЕ В Алгоритм автоматизации системы охлаждения трансформаторов ОРЦ 533000/500 У1.....	62

1 Общая часть

1.1 Анализ необходимости автоматизации

Автоматизация технологических процессов является одним из ключевых звеньев в общей системе функционирования и развития любого современного предприятия. Замена в этой сфере интеллектуального труда человека машинным, научно - обоснованное распределение функций между человеком и компьютером в процессе управления технологией приводит к повышению эффективности и качества принимаемых технологических решений, сокращению сроков их реализации, снижению затрат, более полному использованию имеющихся резервов производственной системы предприятия, обеспечению максимального уровня оперативности и гибкости и т.д.

СШГЭС – мощнейшая ГЭС в России, её установленная мощность 6400 МВт. На СШГЭС установлены 5 блочных трансформаторов ОРЦ-533000/500 У1. Охлаждение трансформаторов является важной составляющей осуществления надежной эксплуатации трансформаторов.

Для трансформаторов, находящихся в эксплуатации, применение автоматизации системы охлаждения обосновывается тем, что в настоящее время необходимо продлить срок службы трансформаторов. Также при автоматизации системы охлаждения снизится нагрузка на оперативный персонал, при этом освобожденное время может быть направлено на другую работу.

Необходимо продлить срок службы уже установленных трансформаторов до экономически целесообразного. Кроме этого, необходимо сократить эксплуатационные затраты на плановые ремонты действующих трансформаторов. Сокращение затрат будет достигнуто путем перехода от нормативно установленных сроков ремонта силовых трансформаторов к проведению ремонта в зависимости от их фактического состояния, одним из факторов увеличения надежности является автоматизация работы трансформаторов.

Проблема оптимизации жизненного цикла блочных трансформаторов, позволяющих на основе информации о конструкции трансформатора и результатах мониторинга прогнозировать протекание физических процессов в различных режимах и повысить надежность эксплуатации трансформатора. Решение задачи повышения эффективности эксплуатации трансформатора предполагает разработку программно-технических средств, позволяющих оценивать текущее состояние в режиме реального времени, выдать необходимые рекомендации. Такая работа может быть классифицирована как решение актуальной научной проблемы с использованием современных средств и методов, позволяющее сократить расходы на эксплуатацию и обслуживание трансформаторов.

Важной частью для автоматизации является измерение температуры трансформатора. Измерение температур верхних слоев масла, температуры масла на входе и выходе из охладителей, температуры окружающей среды, определение температуры наиболее нагретой точки обмотки. Измерения данных

параметров входят в состав системы мониторинга трансформаторного оборудования.

1.2 Трансформаторы с охлаждением типа «Ц»

Трансформаторы являются важными элементами главных схем электростанций, благодаря им становится реальной передача на дальние расстояния потребителям больших объёмов электроэнергии. Силовые трансформаторы повышают уровни напряжения, используемые для генераторов электростанций, до уровней, обеспечивающих как снижение силы тока в линиях электропередач, а соответственно и уменьшение потерь при транспортировке электроэнергии, так и создание условий для устойчивой параллельной работы электростанций с энергетическими системами. На подстанциях, находящихся вблизи потребителей, напряжение после транспортировки электроэнергии снижается до уровней, удобных для приёмников. На электростанциях и подстанциях могут быть установлены как трехфазные трансформаторы, так и группы однофазных трансформаторов, которые могут иметь две или три отдельных обмотки. Блочные трансформаторы электростанций могут иметь в соответствии с классом напряжения большой диапазон номинальных мощностей.

В зависимости от номинальной мощности трансформаторы могут иметь различные системы охлаждения.

Масляные трансформаторы, имеющие небольшую мощность, оборудованы системами охлаждения, у которых масло циркулирует в баке трансформатора за счёт конвекции, а затем поступает в навешенные на стенки радиаторы, в которых охлаждается естественным потоком воздуха. Эти системы охлаждения по классификации международной энергетической комиссии (МЭК) имеет классификацию «ONAN», а по ГОСТ 11677-85 «М». У трансформаторов с видом охлаждения ONAN (M) не бывает, никакой автоматизации во время охлаждения масла.

Если радиаторы, навешенные на баке, оборудованы вентиляторами, которые при включении создают поток воздуха и интенсивнее охлаждают масло, тогда по МЭК вид охлаждения классифицируется как «ONAF», а по ГОСТ 11677-85 «Д». Эти трансформаторы оборудованы автоматикой системы охлаждения. Вентиляторы должны включиться, когда температура масла увеличится до 55 °С или если мощность трансформатора увеличится до номинального значения, когда масло охладится до температуры 50 °С или мощность трансформатора снизится, вентиляторы отключаются.

Для трансформаторов имеющих ещё большую мощность дополнительно к вентиляторам, смонтированным на радиаторах, устанавливают масляные насосы для создания принудительной циркуляции внутри бака. Такой вид охлаждения классифицируется по МЭК как «OFAF», а по ГОСТ 11677-85 «ДЦ». Для этого вида охлаждения предусматривается более сложная система для автоматизации системы охлаждения. Масляные насосы и вентиляторы начинают работать при включении трансформатора в сеть, а при отключении от сети – останавливаются.

Если при работе трансформатора температура масла повышается до определённой уставки, то должна включиться дополнительная, так называемая температурная, группа вентиляторов. В случае аварийного отключения масляного насоса или вентилятора включается резервная группа для продолжения процесса охлаждения масла. Если отключаются все масляные насосы и вентиляторы, тогда трансформатор автоматически отключается от сети.

Трансформаторы, для которых перечисленные выше способы охлаждения не эффективны из-за их большой мощности, снабжают теплообменниками, внутри которых масло охлаждается водой. Такой вид охлаждения по МЭК классифицируется как «OFWF» а по ГОСТ 11677-85 как «Ц». Автоматика системы охлаждения этих трансформаторов обеспечивает автоматическое включение насосов после подачи напряжения на трансформатор, а после его отключения – отключение насосов. Если после включения в сеть температура масла оказалась ниже определённой уставки, то сначала включается пусковой насос, и только после прогрева масла в баке трансформатора включаются рабочие. Для системы охлаждения вида OFWF (Ц) предусмотрено включений резервного маслонасоса при аварийном отключении рабочего насоса или при повышении температуры масла.

Как видно из применяемых методов автоматизации систем охлаждения, все они вступают в работу или при подаче напряжения на трансформатор, или при повышении температуры до определённого значения.

В связи с тем, что от температуры масла во многом зависит срок службы изоляции обмоток трансформатора, соответственно и срок службы трансформатора, то системы охлаждения являются одной из ответственных систем трансформаторов.

При управлении системой принудительного охлаждения трансформатора часто возникает необходимость определения числа задействованных охладителей для обеспечения требуемой температуры верхних слоев масла при колебаниях нагрузки и температуры охлаждающей среды. Решение задачи осложняется большой инерцией системы при реакции на управляющие воздействия.

Оптимальное управление охлаждением силового трансформатора заключается в поддержании заданного температурного режима работы оборудования. Принцип оптимального управления системой охлаждения заключается в принятии решения о необходимости включения/отключения аппаратов системы охлаждения, на сегодняшний день это происходит вручную.

Трансформаторные группы укрупненных блоков СШГЭС собраны из трех однофазных трансформаторов, каждый из которых имеет свою систему охлаждения, связанную с соседними фазами только напорным трубопроводом охлаждающей воды. Трансформаторы работают в режиме полупиковых нагрузок в течение суток, то есть нагрузка меняется от нулевых до максимальных значений. Это связано с режимом работы генераторов в блоке, которые в течение одного дня или нескольких суток поочередно останавливаются в резерв.

Автоматика системы охлаждения блочных трансформаторов типа ОРЦ-533000/500-У1 заключается в следующем:

- После подачи на трансформатор напряжения включается два рабочих насоса, обеспечивающих отвод горячего масла по патрубкам и трубам из верхней части бака трансформатора и подачу его в межтрубное пространство маслоохладителей, где масло охлаждается водой, которая циркулирует в теплообменных трубах. После того, как масло в маслоохладителях охладится, оно по маслопроводу подается в нижнюю часть бака трансформатора;
- При аварийном отключении одного из рабочих маслонасосов автоматически включается резервный маслонасос;
- Если после подачи напряжения на трансформатор температура масла в баке трансформатора ниже $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$, то для исключения перегрузки рабочих насосов из-за повышенной вязкости масла, включается только пусковой маслонасос;
- После прогрева масла в баке трансформатора и достижения температуры масла выше $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ автоматически включаются рабочие насосы и отключается пусковой;
- Затворы подачи воды в маслоохладители автоматически открываются при подаче напряжения на трансформатор, при условии, что температура масла превышает до $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$, если температура масла будет ниже $+5^{\circ}\text{C}$, то затворы откроются после прогрева трансформатора.

В нормальном режиме на каждой фазе трансформатора блока должны работать 2 маслонасоса и 2 маслоохладителя.

Подача воды в маслоохладители осуществляется из системы технического водоснабжения гидроагрегатов через дисковые затворы, имеющие электропривод, установленные на каждом маслоохладителе.

Многолетний опыт эксплуатации блочных трансформаторов показал, что на ведение температурного режима трансформаторов персоналу приходится тратить достаточно много рабочего времени. Аварийные ситуации на станции, чрезмерная загрузка персонала, отсутствие опыта, а порой, и халатность могут привести или к чрезмерному перегреву, или охлаждению масла в трансформаторах из-за отсутствия контроля за температурным режимом.

Хотя нормативно-техническая документация и заводская инструкция не требуют поддержания температуры масла в узких пределах, по факту во время работы в любых режимах температура масла верхних слоёв поддерживается в пределах $35 - 45\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Низкая температура масла верхних слоёв не желательна, а порой и не допускается из-за увеличения вязкости трансформаторного масла, что отражается на способности масла отводить тепло. Это в первую очередь объясняется уменьшением скорости циркуляции масла. Низкая температура масла отрицательно влияет на режим работы электродвигателей маслонасосов системы охлаждения, которые при низких температурах масла начинают работать с перегрузкой и быстро выходят из строя, что в итоге снижает надёжность трансформаторов.

Высокая температура верхних слоёв масла не допускается НТД и заводской инструкцией, она ограничивается величиной 70 °С. Работа с температурой верхних слоёв масла близкой к максимальной не рекомендуется из-за опасности перегрева.

Частые и значительные колебания температуры масла не желательны из-за появления протечек масла по фланцевым соединениям системы охлаждения.

Для разгрузки оперативного персонала и с целью повышения надёжности работы основного оборудования на Саяно-Шушенской ГЭС во время реконструкции систем управления фирма «Ракурс» уже пыталась автоматизировать процесс регулирования температуры. Однако опыт оказался не совсем удачным. При восстановлении Саяно - Шушенской ГЭС на блочных трансформаторах была установлена система управления и мониторинга трансформаторного оборудования (СУМТО), одной из задач которой была автоматизация ведения температурного режима.

Указанная задача не реализована по ряду причин. Основная причина заключается в том, что в настоящее время не существует никаких методических указаний, нормативно-технических документов и т.д., которые могли бы лечь в основу выполнения этой задачи. Ведение температурного режима в настоящее время основано только на опыте, и не имеют никакой теоретической основы.

При ведении температурного режима персонал постоянно контролирует ряд параметров, влияющих на температуру масла в верхних слоях трансформатора. Изменение расхода воды через маслоохладители выполняется при изменениях нагрузки на трансформаторе, при повышении или понижении температуры масла, при изменении температуры наружного воздуха, при изменении температуры воды на входе в маслоохладитель. Расход воды через маслоохладитель зависит напрямую от давления воды в напорной магистрали, давление нельзя поддерживать большим из опасения попадания воды в масло, а при маленьком давлении невозможно обеспечить требуемый расход.

1.3 Методология тепловыделения и теплоотдачи в трансформаторе

Во время работы трансформатора в его магнитопроводе и обмотках возникают потери энергии, связанные с прохождением тока по обмоткам и магнитного потока по магнитопроводу. Эти потери энергии выделяются в виде тепла. Выделяющееся тепло нагревает обмотки и магнитопровод трансформатора и одновременно рассеивается в окружающую среду и отводятся системой охлаждения. Трансформатор является источником тепла и, как всякий источник тепла, нагревает окружающий воздух, остальная часть отводится от трансформатора с применением водомасляных охладителей. Такая система охлаждения называется OFWF и предназначена для отвода тепловых потерь трансформатора блока.

Тепловая энергия, выделяющаяся в обмотках и магнитопроводе трансформатора, отводится системой охлаждения, проходя при этом сложный путь. Этот путь состоит из нескольких участков. На каждом из участков возникает температурный перепад, т. е. разность температур. График перепада

температур представлен на Рисунке 1.1. Эта разность тем большая, чем больше величина теплового потока. На участках, имеющих протяженность, например, в обмотке, перепад определяется разностью температур между наиболее нагретой внутренней точкой обмотки и наружной поверхностью обмотки. На границах участков, например, обмотка — масло, температурный перепад определяется разностью температур наружной поверхности обмотки и масла.

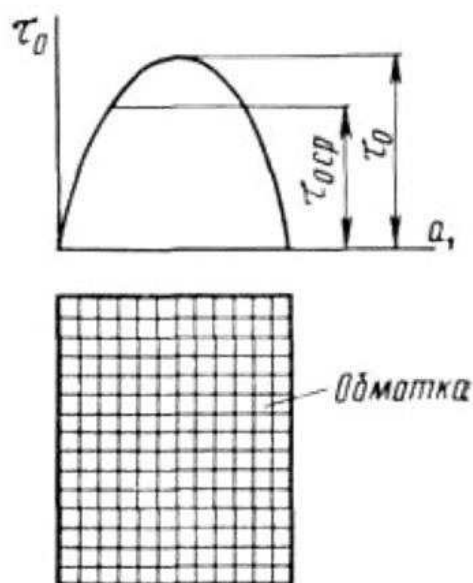


Рисунок 1.1 – График перепада температур в обмотке

Участки прохождения теплового потока представлены на Рисунке 1.2. Рассмотрим подробнее прохождение теплового потока:

1. Участок — от внутренних точек обмотки или сердечника до их наружных поверхностей, омываемых маслом. На этом участке теплопередача осуществляется путем теплопроводности. При расчете принято определять не температуру наиболее нагретой точки обмотки, а среднюю температуру всей обмотки.

Наиболее горячая точка обмотки (ННТ), как это видно по показаниям системы мониторинга трансформаторного оборудования блочных трансформаторов СШГЭС (СУМТО) находится в верхней зоне обмотки, и температура этой точки примерно на 15 °С выше средней температуры обмотки.

2. Переход тепла от обмоток к маслу происходит при наличии разности температур обмоток и масла. Разность температур поверхности обмотки и омывающего ее масла зависит от количества тепла, выделившегося с поверхности обмотки, расположения охлаждаемых маслом поверхностей обмотки, размеров масляных каналов и вязкости масла.

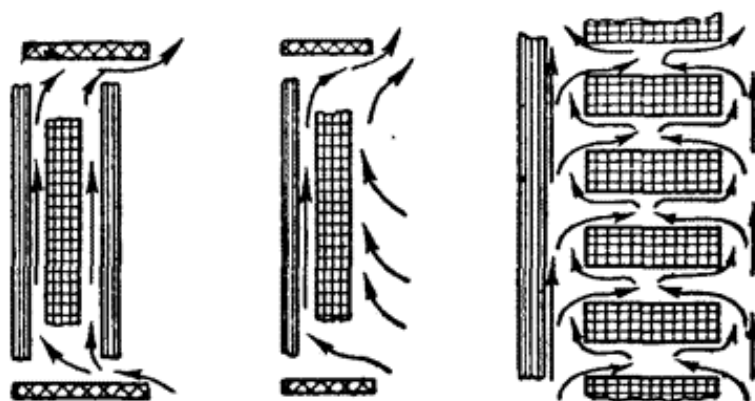


Рисунок 1.2 – Участки прохождения теплового потока

Слой масла у поверхности обмотки, в котором происходит основной переход тепла от обмотки к маслу, имеет очень небольшую толщину порядка 1,5 мм и движется со сравнительно большой скоростью. Разность температур поверхности обмотки и масла в нижних и верхних слоях по показаниям (СУМТО) значительно отличаются. Схема измерения СУМТО показана на Рисунке 1.3. Значения температур, измеренные в различных участках трансформатора представлены в Таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Значения температур в трансформаторе

Температура, (град. С)	Фаза «А»	Фаза «В»	Фаза «С»
Наиболее нагретая точка (ННТ)	59,2	63,4	60,7
Обмотка НН	50,7	52,5	56,2
Обмотка ВН	41,7	52,7	48,2
Температура нижних слоёв масла (НСМ)	25,5	23,5	23,6
Температура верхних слоёв масла (ВСМ)	34,5	36,1	35,7

3. Переход тепла на участке от обмотки до стенки бака и трубок маслоохладителей. Масло, омывая обмотки трансформатора, уносит с поверхности обмотки выделяющееся в ней тепло. Нагретое у поверхности обмотки масло поднимается в верхнюю часть бака трансформатора, подаётся маслонасосами в маслоохладители, в которых соприкасается со стенками трубок и отдает им часть тепла, а затем вновь возвращается к обмоткам. Поток масла в баке является замкнутым. Таким образом, в работающем трансформаторе происходит непрерывный процесс циркуляции масла.

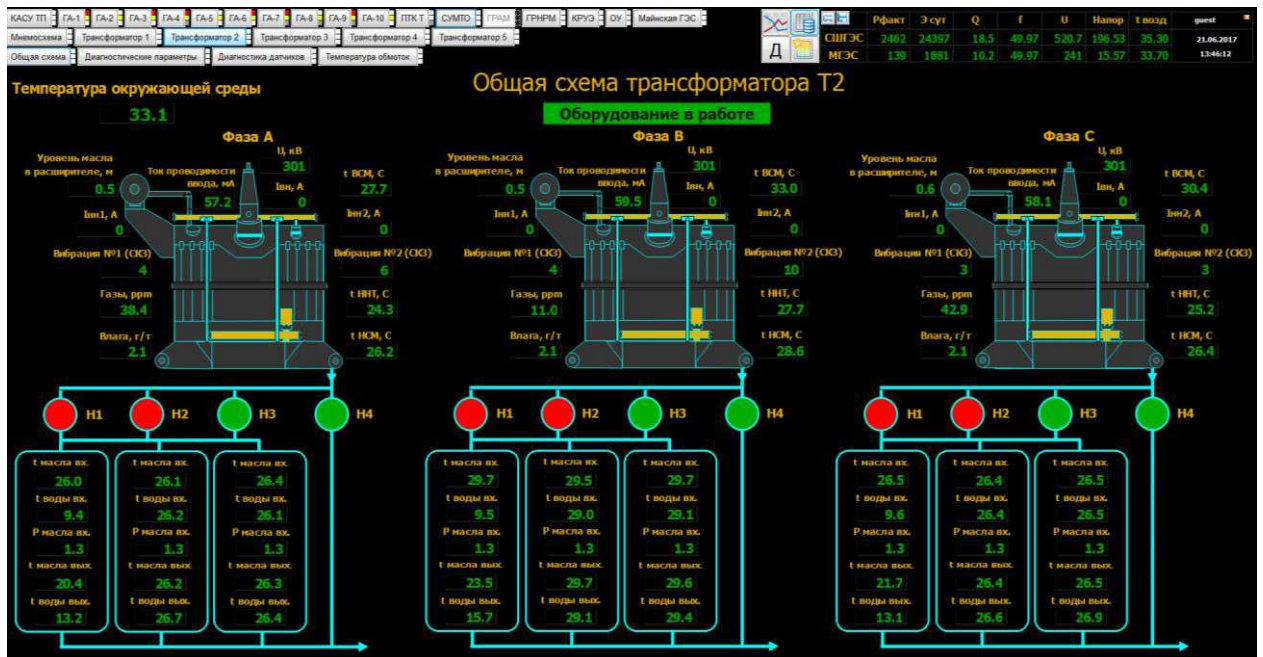


Рисунок 1.3 – Схема измерения СУМТО СШГЭС

Часть выделившегося тепла передаётся от стенки бака в атмосферу. С наружной поверхности стенки бака тепло отводится в окружающий воздух двумя путями: часть тепла отводится конвекционным потоком воздуха, вторая часть отводится путем излучения.

2 Оценка технического состояния трансформаторного оборудования

2.1 Расчет тепловыделения в трансформаторе ОРЦ-533000/500 У1

Как известно, потери в трансформаторе пропорциональны весу активных материалов — меди и стали, а, следовательно, и их объему или кубу линейных размеров. Охлаждающая же поверхность трансформаторов растет пропорционально квадрату линейных размеров.

В соответствии с Руководством по эксплуатации трансформаторов типа ОРЦ-533000/500-У1 установлено, что:

- Температура масла у трансформаторов (с системой охлаждения OFWF) не должна превышать 70°C.
- Температура обмоток трансформатора не должна превышать 100°C.
- При повышении температуры масла более 90°C или температуры обмотки выше 105 °C, защита действует на предупредительный сигнал.
- При повышении температуры масла выше 100°C или температуры обмотки выше 115°C защита действует на отключение трансформатора.
- Температура охлаждающей воды на входе в маслоохладители не должна превышать 25°C.
- Критерием нормальной работы маслоохладителя является снижение в нем температуры на 10°C (разность температур входящего и выходящего масла) при номинальной нагрузке трансформатора.

При соблюдении этих условий изоляция трансформаторов подвергается такому старению, что она может надежно работать в течение примерно 40 лет. Однако вопрос сколько по времени на самом деле будет служить оборудование всегда являлся актуальным. За решение этого вопроса отвечает техническая диагностика, в заключительную стадию которой входит «прогнозирование технического состояния». Сегодня, несмотря на широкий выбор систем мониторинга трансформаторного оборудования (СУМ - ТО; SAFE-T, TDM; Siemens, ABB Sech-ego1 и т.д.) нет четких методик прогнозирования состояния и остаточного ресурса трансформаторного оборудования, что является необходимым для планирования ремонтов и замены трансформаторного оборудования.

2.2 Оценка технического состояния трансформаторного оборудования

Задачами мониторинга и дальнейшей диагностики трансформаторов и его вспомогательного оборудования являются: выявление и определение дефектов, оценка функциональной исправности оборудования, определение возможности продолжения эксплуатации без ремонта, в случае необходимости определение объемов ремонта и остаточного срока службы. Элементы трансформаторов, подверженные разрушающим воздействиям, представлены на Рисунке 2.1.

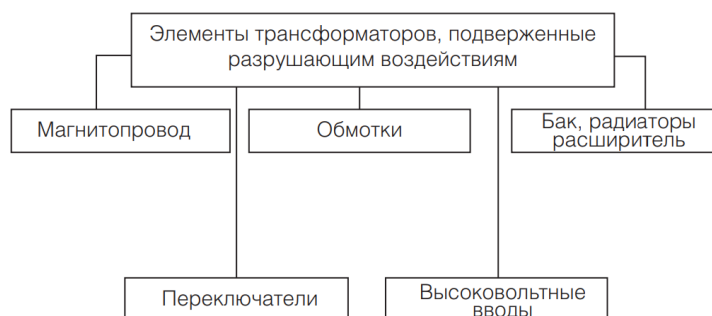


Рисунок 2.1 – Элементы трансформаторов, подверженные разрушающим воздействиям

Диагностика, основанная на обработке текущих значений параметров трансформатора, находящегося в работе, это перспективное направление развития, позволяющее определить состояние элементов трансформатора без вывода его из системы электроснабжения, что повысит надежность энергоснабжения, создать условия перехода на обслуживание по техническому состоянию и снизить средства на амортизационные отчисления. В Таблице 2.1 представлены современные методы диагностики трансформаторов.

Таблица 2.1 - Современные методы диагностики трансформаторов

Метод	Контролируемый параметр	Обнаруживаемые виды дефектов
Телевизионный	Температура исследуемой поверхности	Витковые замыкания; Дефекты контактов РПН; нарушения изоляции магнитопровода; образование застойных зон в баке; нагревы внутренних контактных соединений; обрыв заземляющих шин
Вибрационный	Виброскорость, виброускорение, виброперемещение	Распрессовка обмоток или магнитопровода
Анализ масла	Химический состав содержание влаги	Короткие замыкания; Тепловые воздействия на масло; частичные разряды; тепловые воздействия на бумагу
Ультразвуковой (контроль изоляции)	Звуковые волны, образованные частичными разрядами	Частичные разряды в изоляции; ослабление соединений в обмотках; локальные нагревы

Продолжение таблицы 2.1

Метод	Контролируемый параметр	Обнаруживаемые виды дефектов
Мониторинг параметров	Ток, напряжение, частота	Ненормальные режимы работы

Основные направления мониторинга: контроль за нормальными режимами работы трансформатора; контроль и отключение при ненормальных режимах работы, которые оказывают недопустимые воздействия на оборудование; контроль и диагностика технического состояния оборудования.

2.3 Система мониторинга трансформаторного оборудования

Современный уровень автоматизации позволяет расширить возможности непрерывного контроля с помощью применения стационарных систем мониторинга и диагностики силового трансформаторного оборудования и повысить, тем самым, надежность работы энергосистемы в целом.

Согласно СТО РусГидро 02.01.059-2011 (СТО 70238424.27.140.023-2010) выполняются ряд измерений, которые производятся постоянно, это:

- Активная мощность на стороне среднего напряжения;
- Ток одной (одноименной) фазы на сторонах всех напряжений;
- Ток общей части обмотки автотрансформатора блока генератор-трансформатор. Силовые трансформаторы (автотрансформаторы) связи шин генераторного напряжения с энергосистемой
- Токи на стороне линии (блока трансформатор-линия), фазы А (В, С)
- Температура верхних слоев масла в баке трансформатора (автотрансформатора)

Дополнительные функции (по специальному разрешению):

- Температура образования пузырьков;
- Степень старения изоляции и т.д.

2.3.1 Контроль теплового состояния

Контроль тепловых процессов в обмотках трансформатора необходим для отслеживания изменений температур и способствует раннему влиянию на негативные факторы, из-за которых происходит увеличение температур.

Одной из систем от перегрева является интеллектуальная система защит трансформатора от перегрева QUALITROL 509 ITM. Данная система производит прямое измерение температур обмоток при помощи 8 оптоволоконных зондов, которые расположены внутри обмоток трансформатора. Схема системы показана на Рисунке 2.2.

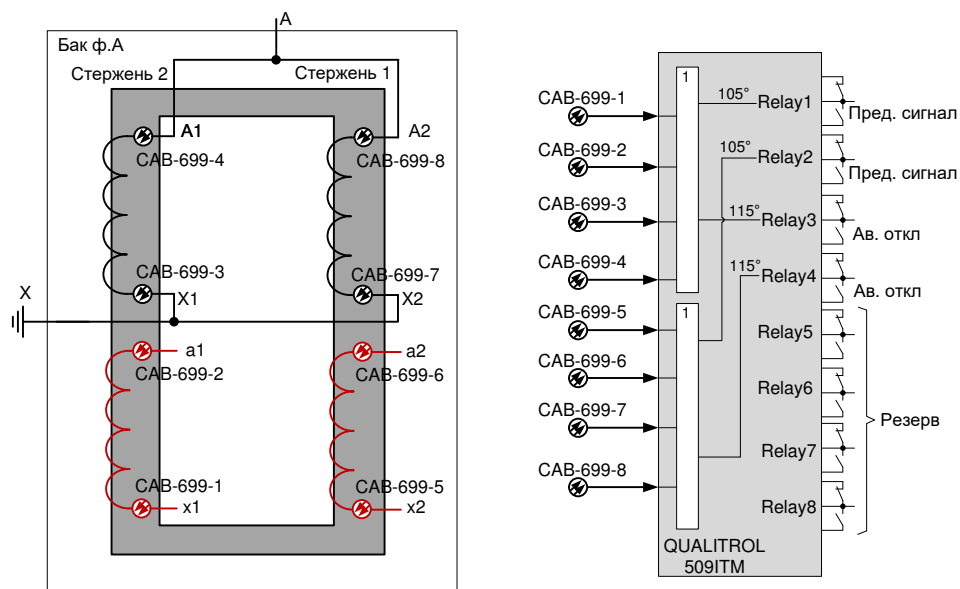


Рисунок 2.2 - Схема системы QUALITROL 509 ITM

Система имеет 8 выходных реле, 2 из которых действуют на сигнал при температуре 105°C, 2 на отключение при температуре 115°C, остальные 4 реле являются резервными. Также система имеет выход для USB для подключения к ПК, имеет RS выход для связи с ШУМТ и Ethernet резерв. QUALITROL 509 ITM осуществляет расчет температуры обмоток трансформатора с учетом нагрузки на трансформаторе, условий окружающей среды и температуры масла. Также показания от данного датчика могут использоваться для расчета остаточного ресурса трансформаторов.

2.3.2 Контроль газосодержания и влагосодержания масла

Трансформаторное масло – важный элемент системы, параметры которого оказывают непосредственное влияние на работу, поэтому его данные должны подвергаться постоянному контролю. Кроме того, они позволяют судить о режимах работы трансформатора и его состоянии.

Хроматографический анализ позволяет: отслеживать развитие процессов в оборудовании; выявлять дефекты на ранней стадии их развития, не обнаруживаемые традиционными способами; определять предполагаемый характер дефекта и степень имеющегося повреждения; правильно ориентироваться при определении места повреждения. Взаимосвязь газов и характерных видов дефектов представлена в Таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Взаимосвязь газов и характерных видов дефектов

Газ	Характерные дефекты	Характер дефектов
H ₂ водород	Частичные разряды, искровые и дуговые разряды	Дефекты электрического характера

Продолжение таблицы 2.2

Газ	Характерные дефекты	Характер дефектов
СН ₄ метан	Перегрев масла и бумажномасляной изоляции или перегрев масла и бумажномасляной изоляции, сопровождающийся разрядами	Дефекты термического характера
С ₂ Н ₆ этан	Перегрев масла и бумажномасляной изоляции в диапазоне температур С	
С ₂ Н ₄ этилен	Перегрев масла и бумажномасляной изоляции	
СО угарный газ	Старение и увлажнение масла и (или) твердой изоляции	
СО ₂ углекислый газ	Старение и увлажнение масла и (или) твердой изоляции	

Из Таблицы 2.2 видно, что одинаковые виды дефектов могут характеризоваться присутствием различных газов. Распространение одного вида дефектов влечет за собой появление новых, поэтому своевременное их обнаружение и устранение позволит не только избежать аварий, но и продлить срок службы оборудования. Как правило, анализ производится не по всем газам, а по части из них, однако, чем меньшая номенклатура газов учитывается, тем меньше возможности своевременно выявить начинающееся повреждение трансформатора.

В настоящее время с помощью хроматографического анализа можно определить две группы повреждений силовых трансформаторов:

- 1) дефекты твердой изоляции: перегревы и ускоренное старение твердой электрической изоляции; частичные разряды в бумажно-масляной изоляции.
- 2) перегревы металла и частичные разряды в масле: дефекты токоведущих частей; дефекты контактных соединений; дефекты магнитопровода; дефекты конструктивных частей, в том числе с образованием короткозамкнутых контуров.

Для дефектов первой группы характерно выделение углекислого газа и окиси углерода. Для трансформаторов с открытым дыханием и азотной защитой масла в качестве критерия оценки состояния используется концентрация

углекислого газа. Установлено, что опасные дефекты первой группы имеют место при повышенных концентрациях CO₂.

Примером современного прибора, используемого в системе мониторинга трансформаторов для контроля состояния масла является система Smart. Данная система непрерывно измеряет растворенные газы в масле силового трансформаторного оборудования среднего и высокого класса напряжения. Основная задача системы – выявить развивающийся дефект силового трансформатора до того момента, как это приведет к отказу и аварийному отключению или полному выходу оборудования из строя. Система Smart работает по технологии NDIR (Non – Dispersion InfaRed, не дисперсионного ИК анализа), которая представляет из себя широкополосный ИК – излучатель, который полностью покрывает диапазон длин волн, соответствующий измеряемым газам. Оптические фильтры позволяют выделить узкие поддиапазоны, в которых поглощают излучение соответствующие газы. Особенности различных технологий измерения концентраций газов представлены в Таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Особенности различных технологий измерения концентраций газов

Технология	Преимущества	Недостатки	Точность	Цена
NDIR (Недисперсионный инфракрасный анализ)	<ul style="list-style-type: none"> •одновременное измерение газов; • не нужна калибровка; • минимум обслуживания; • малое время измерения газа; • высокая легкость установки. 	<ul style="list-style-type: none"> •ограничения по определению очень низких концентраций газов; •интерференция газов может влиять на погрешность показаний, но это обычно компенсируется. 	хорошая	низкая
NIR (Ближний инфракрасный анализ)	<ul style="list-style-type: none"> •одновременное измерение газов; •нечастые калибровки; •минимум обслуживания; •легкая установка. 	<ul style="list-style-type: none"> •ограничения по определению очень низких концентраций газов; • интерференция газов может влиять на замеры. 	низкая	средняя

Продолжение таблицы 2.3

Технология	Преимущества	Недостатки	Точность	Цена
ХАРГ (Хроматография)	<ul style="list-style-type: none"> •возможность измерения различных газов и соединений; •базируется на стандартах во многих лабораториях. 	<ul style="list-style-type: none"> •нужны частые калибровки; •нужен дополнительный газ (носитель) – ведет к росту расходов; •сложность в установке и применении системы. 	хорошая	высокая
ФАС (PAS) (Фото-акустическая спектроскопия)	<ul style="list-style-type: none"> •может определять/измерять очень низкие концентрации (ppm и ppb) газа; •минимум обслуживания (в зависимости от системы используемых фильтров) 	<ul style="list-style-type: none"> •ограничения по определению высоких концентраций газов; •интерференция газов может влиять на погрешность показаний, но это обычно компенсируется; •вибрация влияет на показания; •есть сложности/ограничения в установке. 	хорошая	высокая
Электрохимия	<ul style="list-style-type: none"> •малый размер сенсора; •хороша для измерения газов, трудно измеряемых другими технологиями 	<ul style="list-style-type: none"> •нужны частые калибровки; •короткий/ограниченный срок службы сенсора – требуется замена; •измеряется только один газ. 	низкая	низкая

2.3.3 Контроль состояния высоковольтных вводов

Для измерения электрической емкости и тангенса угла диэлектрических потерь в изоляции высоковольтных вводов традиционно используется метод суммирования токов. Сума токов утечки, измеренных на трех ответвлениях высоковольтных вводов, дает ток небаланса.

В основе методики контроля емкости ввода и тангенса диэлектрических потерь, лежат два явления.

- Ток через изоляцию ввода практически пропорционален емкости. Изменение емкости C_1 вызывает пропорциональное изменение тока.

- Изменение тангенса угла диэлектрических потерь изменяет активную составляющую тока через изоляцию ввода и также отражается в токе небаланса:

$$\gamma = \frac{\Delta I}{I_0} = \sqrt{(\Delta \tan \delta)^2 + \left(\frac{\Delta C}{C_0}\right)^2}. \quad (2.1)$$

Кроме того, принцип метода суммы токов основан и на том факте, что в трехфазной системе напряжения на шинах равны и параметры вводов (или трансформаторов тока) идентичны, при этом векторная сумма токов через ИВ (измерительные выводы) вводов будет равна нулю. Ток ввода представляет собой токи утечки из-за емкостного тока или тангенса угла потерь. В действительности вводы всегда различаются, также, как и напряжения на шинах. Как следствие, будет присутствовать малая начальная сумма токов, уникальная для каждой тройки вводов. Когда изоляция одного из вводов начинает ухудшаться, его емкость и/или тангенс будут изменяться и, соответственно, сумма токов будет отличаться от начального значения. Таким образом, состояние изоляции ввода среди тройки может быть определено оценкой изменения суммы токов.

Также контроль состояния вводов оценивается с помощью измерений частичных разрядов, которые являются результатом возникновения локальных концентраций электрической напряженности поля в изоляции или на ее поверхности, превышающей электрическую прочность изоляции в отдельных местах.

Частичные разряды сразу не приводят к пробое изоляционных промежутков. Образование частичных разрядов в локальных объемах изоляции вызывает снижение диэлектрических и других характеристик и частичную деструкцию. Эти процессы обычно медленные. Поскольку размеры локальных объемов изоляции с частичных разрядов по сравнению с толщиной изоляционных промежутков относительно малы, скорость разрушения изоляции зависит от энергетических характеристик частичных разрядов (или их интенсивности). Разрушающая способность частичных разрядов может быть различной. В связи с этим при малой интенсивности ЧР электроизоляционные системы сохраняют свои функции в период эксплуатационного периода оборудования, а при большой интенсивности подвергаются разрушению и приводят к отказу до истечения установленного срока эксплуатации.

Контроль состояния вводов может осуществляться с помощью прибора Intellix BMT 300. Intellix BMT 300 – это система реального времени компании GE, которая постоянно контролирует не только состояние вводов (емкость и коэффициент мощности), но и также активность частичных разрядов (ЧР) в главном трансформаторном баке. Это позволяет предупреждать персонал об

условиях отказа на ранней стадии и предоставляет необходимую информацию о состоянии вводов и трансформатора.

К основным достоинствам данного прибора можно отнести:

- Один прибор, объединяющий непрерывный контроль вводов и детектирование активности ЧР в главном баке, используя один и тот же тест-адаптер вводов.
- Диагностическое программное обеспечение (ПО) Perception™ компании GE, используемое для получения простой для анализа информации об активности ЧР и содержании растворенных газов.

Контроль состояния вводов может осуществляться с помощью модуля «PD Monitor», который входит состав системы мониторинга TDM. Основное различие состоит в том, что в модуле «PD Monitor», сразу же, на аппаратном уровне, в режиме реального времени, решается вопрос о том, является ли данный импульс следствием возникновения частичных разрядов в контролируемом оборудовании, или он имеет другую природу возникновения. Для этого используются специальные алгоритмы, оценивающие параметры входных импульсов. Благодаря этому пользователь принимает участие только в процедуре анализа распределения импульсов, что оптимизирует процесс диагностики. Структура системы PD Monitor показана на Рисунке 2.3.

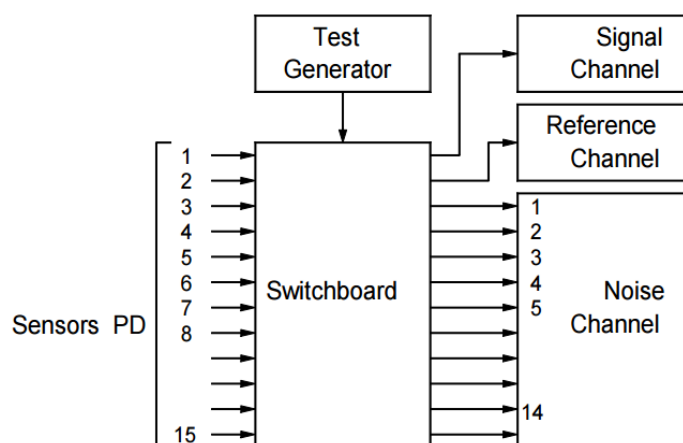


Рисунок 2.3 - структура PD Monitor

На входной высокочастотный коммутатор модуля «Switchboard» модуля поступает до 15 сигналов от первичных датчиков и один тестовый сигнал от встроенного генератора калибровочных частичных разрядов. Количество используемых первичных каналов определяется пользователем, в каждом конкретном случае в зависимости от типа контролируемого оборудования и решаемой диагностической задачи. При помощи программно-управляемого входного коммутатора первичные сигналы от датчиков, в любом порядке, могут быть поданы на 16 выходных линий. При помощи сигнала от тестового генератора, который при помощи внутреннего коммутатора может быть подан в любой измерительный канал, производится проверка и тестирование входных цепей и измерительных каналов модуля перед каждым измерением. Регистрация частичных разрядов по каналам всегда производится последовательно, по

выбору пользователя. Сигнал с этого канала подается на измерительный канал «Signal Channel», показанный на блок – схеме модуля. Внутри измерительного канала, в режиме реального времени, анализируются временные и амплитудные параметры каждого импульса, и принимается решение, можно ли считать пришедший им пульс результатом возникновения в контролируемом оборудовании частичного разряда в изоляции, или это результат воздействия помех. Важную роль в борьбе с помехами играет использование «референсного» канала «Reference Channel». Существует много измерительных схем, в которых выявление «истинности» импульса ЧР производится сравнением параметров импульса по измеряемому каналу, с параметрами сигнала, проходящего по дополнительному, опорному, референсному каналу. При этом обычно, датчик, подключаемый к референсному каналу, располагается, на контролируемом объекте, рядом с основным измерительным датчиком, или на фиксированном удалении от него, или имеет отличия во внутреннем устройстве.

Канал «Noise Channel» предназначен для реализации в модуле принципа «амплитудной разборки». При «синхронном» появлении на «шумовом канале» импульса, амплитуда которого равна или превышает амплитуду импульса по «измерительному каналу», на выходе шумового канала появляется импульс, который блокирует регистрацию данного импульса.

Особенностью работы модуля «PD Monitor» является то, измерение параметров частичных разрядов по любому выбранному каналу всегда производится с учетом работы референсного и шумового каналов. Работа всех измерительных каналов происходит синхронно, в режиме реального времени. Только такой подход дает возможность максимально отстроиться от помех различного типа, количество которых в высоковольтном оборудовании очень велико.

2.4 Расчет остаточного ресурса трансформаторов

Ресурс трансформаторного оборудования определяется по состоянию изоляции обмотки и рассчитывается исходя из времени эксплуатации, величины загрузки и теплового состояния. Нормативный срок службы изоляции обмотки составляет около 20–25 лет с учетом того, что температура наиболее нагретой части обмотки не превышает 98 °С. При нарушении нормального режима работы нормативный срок службы изоляции обмотки может изменяться.

Для расчетов приняты следующие допущения:

- изменения температуры в переходных тепловых процессах, т. е. при учете тепловых постоянных времени, принимать протекающими по экспоненциальному закону, а допустимо установившиеся значения температуры при этом достигаются за промежуток времени, равный четырем тепловым постоянным времени;
- при расчете не учитывается изменение сопротивления обмоток, теплоемкости и вязкости масла с повышением температуры вследствие практически приемлемой компенсации их взаимного влияния на температуру обмоток;

- для трехобмоточных трансформаторов (автотрансформаторов) измерения тока нагрузки следует проводить для наиболее нагруженной обмотки;
- при неравномерной нагрузке трансформатора (автотрансформатора) измерения тока нагрузки следует проводить для наиболее нагруженной фазы обмотки.

Исходными данными для решения задачи по каждому трансформатору (автотрансформатору) являются:

Δt – интервал накопления и обобщения (усреднения) сигналов телеизмерений, мин.;

$\Delta K_{ст}$ – ширина коридора зоны нечувствительности, определяющая точность формирования ступенчатого графика нагрузки, %.

$I_{н ном}$ – номинальный ток нагрузки, А;

$T_{обм}$ – тепловая постоянная обмотки, мин;

$F_{ном}$ – нормированный износ витковой изоляции (срок службы трансформатора (автотрансформатора)), «нормальные сутки износа»;

$F_{пред}$ – фактический предыдущий износ витковой изоляции до ввода в эксплуатацию задачи на рассматриваемом объекте.

$\Theta_{ннтср}$ – средняя измеренная температура наиболее нагретой точки.

Формирование исходных суточных графиков нагрузки и температуры масла по каждому трансформатору (автотрансформатору) производится в интервалах Δt (параметр, настраиваемый в минутах) путем усреднения значений телеизмерений тока нагрузки I_n и температуры масла θ_m . Их размерность определяется кратностью заданного интервала Δt к длительности суток, выраженных в минутах. Выбор точки измерения тока нагрузки определяется пользователем с учетом изложенных выше допущений.

В автоматическом режиме запуск задачи осуществляется в момент смены суток для определения износа витковой изоляции обмотки за истекшие сутки. В полуавтоматическом режиме запуск задачи производят по команде оператора с указанием даты контролируемых суток, по которому необходимо произвести расчет износа витковой изоляции обмотки. Этот режим позволяет проводить выборочный контроль суточного износа витковой изоляции обмоток.

При каждом запуске функции на основании исходного суточного графика нагрузки осуществляют построение расчетного суточного графика относительной нагрузки:

$$K_1 = \frac{I_{н1}}{I_{ном}}; K_2 = \frac{I_{н2}}{I_{ном}}; \dots; K_n = \frac{I_{нn}}{I_{ном}}; \quad (2.2)$$

где 1, 2, ..., n – подстрочные индексы, обозначающие порядковые номера усредненных значений телеизмерений тока нагрузки;

$I_{н ном}$ – номинальный ток нагрузки (настраиваемый параметр).

Алгоритм преобразования расчетного исходного графика относительной нагрузки контролируемых суток в ее эквивалентный прямоугольный график при заданном значении $\Delta K_{ст}$ и полном или частичном отсутствии данных по

телеизмерениям за первые предыдущие сутки относительно контролируемых суток предполагает выполнение следующих процедур:

- Расчет значений нижней и верхней границ коридора зоны нечувствительности в соответствии с величиной первой относительной нагрузки ее исходного расчетного суточного графика:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{1H} = K_1 - \frac{\Delta K_{cm} \cdot K_1}{100}; \\ K_{1B} = K_1 + \frac{\Delta K_{cm} \cdot K_1}{100}; \end{array} \right\} \quad (2.3)$$

- Проверку на вхождение в коридор зоны нечувствительности последующих значений относительной нагрузки исходного контролируемого суточного графика нагрузки:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{1H} \leq K_2 \leq K_{1B}; \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots; \\ K_{1H} \leq K_{l-1} \leq K_{1B}; \\ K_{1H} \leq K_l \leq K_{1B}; \end{array} \right\} \quad (2.4)$$

- Фиксацию порядкового номера текущего значения относительной нагрузки K_i , которое вышло из коридора зоны нечувствительности;
- Определение среднего значения относительной нагрузки для первой ступени по значениям относительных нагрузок $K_1 \dots K_{l-1}$.
- Формирование следующей ступени эквивалентного прямоугольного графика нагрузки путем расчета значений верхней и нижней границ коридора зоны нечувствительности относительно значения нагрузки K_l , начиная с относительной нагрузки K_{l+1} и далее расчет среднего значения относительной нагрузки для второй ступени. В итоге последовательное выполнение описанных выше процедур на протяжении всего исходного расчетного суточного графика относительной нагрузки обеспечивает построение эквивалентного прямоугольного графика относительной нагрузки с точностью, определяемой шириной зоны нечувствительности ΔK_{cm} (параметр настраиваемый).

Одновременно ведется подсчет длительности каждой ступени:

$$\Delta T_1 = S_1 \Delta t; \Delta T_2 = S_2 \Delta t; \dots; \Delta T_m = S_m \Delta t, \quad (2.5)$$

где $S_1; S_2; \dots; S_m$ – количество относительных нагрузок исходного расчетного суточного графика нагрузки;

Δt – интервал накопления и обработки телеизмерений (параметр, настраиваемый в минутах);

1, 2, ..., m – подстрочные индексы, обозначающие порядковые номера ступеней нагрузки.

Алгоритм преобразования исходного расчетного суточного графика относительной нагрузки контролируемых суток в эквивалентный прямоугольный график относительной нагрузки при наличии полной базы данных по телеизмерениям за первые предыдущие сутки относительно контролируемых суток предполагает выполнение описанных выше процедур, начиная с последнего значения относительной нагрузки за первые предыдущие сутки относительно контролируемых суток. Для первой ступени контролируемых суток фиксируется значение относительной нагрузки по последней ступени первых предыдущих суток относительно контролируемых суток при условии ее дальнейшего продолжения в контролируемых сутках.

Температура масла учитывает температуру окружающей охлаждающей среды, условия охлаждения и предыдущую нагрузку. Построение суточного расчетного графика теплового состояния ННТ обмотки производится на основе суточного эквивалентного прямоугольного графика относительной нагрузки, алгоритм построения которого описан выше. При этом текущие значения температуры ННТ обмотки определяется по измерениям системы мониторинга.

Далее определяется износ изоляции и остаточного ресурса обмотки. Фактический износ витковой изоляции обмотки по каждой ступени контролируемых суток ΔT_m ($m=1, \dots, m$) в «нормальных сутках износа» (суточная гистограмма фактического износа) определяется согласно:

$$F_l = \frac{2 \cdot [\theta_{\text{ннтсрл}} - \theta_{\text{ннтбл}}] \cdot \Delta T_l}{\frac{\Delta}{24 \cdot 60}}, \quad (2.6)$$

где $\theta_{\text{ннтсрл}}$ - среднее значение температуры ННТ обмотки по каждой ступени эквивалентного прямоугольного графика нагрузки;

$\theta_{\text{ннтбл}}$ - базовая условно постоянная температура наиболее нагретой точки обмотки, при которой скорость расчетного износа витковой изоляции, °С, Для витковой изоляции класса нагревостойкости А следует принимать 98°С.

Δ - температурный интервал, при изменении на который температуры наиболее нагретой точки обмотки расчетный износ витковой изоляции изменяется в два раза; принимать $\Delta=6^\circ\text{C}$, если нет других значений, определяемых из характеристик витковой изоляции «температура – срок службы»;

ΔT_l - длительность каждой ступени.

Фактический суммарный суточный износ витковой изоляции обмотки в «нормальных сутках износа» по эквивалентному ступенчатому графику нагрузки определяется согласно:

$$F_{\text{сум}} = \sum_1^l F_l; \quad (2.7)$$

где m (1,2,...,m) - текущий номер и количество суммируемых ступеней;

F_1 - фактический износ по каждой ступени нагрузки в «нормальных сутках износа».

Фактический суммарный износ витковой изоляции обмотки в «нормальных сутках износа», считая от даты ввода в эксплуатацию трансформатора (автотрансформатора) на данной подстанции, можно рассчитать:

$$F = F_{\text{пред}} + F_{\text{сут}}, \quad (2.8)$$

где $F_{\text{пред}}$ - фактический предыдущий износ витковой изоляции обмотки в «нормальных сутках износа» до ввода в эксплуатацию.

Фактический остаточный ресурс витковой изоляции обмотки в «нормальных сутках износа» находим по формуле:

$$F_{\text{ост}} = F_{\text{ном}} + F, \quad (2.9)$$

где $F_{\text{ном}}$ - нормативный износ витковой изоляции обмотки в «нормальных сутках износа» (параметр настраиваемый).

В результате решения задачи для каждого трансформатора (автотрансформатора) формируются и выводятся на печать:

- Исходные суточные графики нагрузки и температуры масла;
- Суточный исходный расчетный график относительной нагрузки;
- Суточный эквивалентный прямоугольный график относительной нагрузки;
- Гистограмма суточного износа витковой изоляции обмоток.

2.5 Алгоритм расчета остаточного ресурса трансформатора

Расчет проведен с целью дальнейшего автоматического расчета остаточного ресурса трансформаторов по данным мониторинга трансформатора. Данный расчет будет проводится по алгоритму, представлен в Приложении А.

Пояснения к алгоритму представлены ниже:

1. Начало, ввод данных.
2. Запуск счётчика цикла времени.
3. Ввод измеренных величин тока и температуры наиболее нагретой точки в текущий момент времени.
4. Определение порядкового номера очередности цикла ввода тока и температуры.
5. Ввод индекса, равного единице, для первого цикла постоянного коэффициента нагрузки суточного графика.
6. Расчёт коэффициента относительной нагрузки.
7. Расчёт нижнего значения коридора нечувствительности.

8. Расчёт верхнего значения коридора нечувствительности.
9. Расчёт времени для постоянного коэффициента нагрузки.
10. Проверку на вхождение в коридор зоны нечувствительности
11. Вывод значений постоянного коэффициента относительной нагрузки, времени постоянного коэффициента нагрузки, износа изоляции для времени с постоянным коэффициентом нагрузки для каждого цикла расчёта.
12. Расчёт износа изоляции для времени с постоянным коэффициентом нагрузки.
13. Расчёт индекса следующего цикла постоянного коэффициента нагрузки суточного графика.
14. Расчёт очередного значения коэффициента нагрузки суточного графика.
15. Проверка окончания цикла.
16. Расчёт суточного износа изоляции.
17. Расчёт остаточного ресурса изоляции.
18. Вывод значения остаточного ресурса изоляции.
19. Окончание.

3 Разработка автоматизации системы охлаждения трансформаторов ОРЦ 533000/500 У1 СШГЭС

3.1 Расчет потери энергии

В работе проведены исследования в области электротехники и теплотехники, проанализированы основные процессы, проходящие в трансформаторе, маслоохладителях системы охлаждения, в системе технического водоснабжения. По результатам выполненных исследований разработана методика по порядку расчета необходимого расхода охлаждающей воды в зависимости от мощности трансформатора, температуры верхних слоёв масла, температуры охлаждающей воды.

Методика, ориентированная на увеличение или уменьшения интенсивности охлаждения трансформатора не по факту изменения температуры масла в верхних слоях, а с воздействием по возмущению, по факту изменения мощности трансформатора, может быть использована не только для трансформаторов СШГЭС, но и для трансформаторов имеющих такой же вид системы охлаждения на других гидроэлектростанциях РусГидро, а также в сетевых компаниях.

Регулирование по возмущению — это регулирование с опережением, потому что прогнозируется ожидаемое изменение температуры масла в трансформаторе в результате изменения мощности трансформатора и принимаются меры прежде, чем это изменение температуры происходит.

Это фундаментальное различие между регулированием с воздействием по возмущению, по изменению мощности, и регулированием с обратной связью, то есть с регулированием по факту повышения температуры. Контур регулирования с воздействием по возмущению пытается нейтрализовать изменение мощности прежде, чем оно изменит температуру масла, в то время, как контур регулирования с обратной связью пытается отрабатывать факт изменения мощности после того, как оно воздействует на температуру масла.

Система регулирования с воздействием по возмущению имеет очевидное преимущество перед системой регулирования с обратной связью. При регулировании по возмущению в идеальном случае величина регулируемой переменной не изменяется, она остается в пределах установленного диапазона. Ручное регулирование по возмущению требует более сложного понимания того влияния, которое возмущение окажет на регулируемую переменную, а также использования более сложных и точных приборов. При использовании системы регулирования по возмущению обычно её сочетают с системой регулирования с обратной связью, при этом одновременно сочетаются два контура управления.

Потери энергии в любом трансформаторе складываются из потерь короткого замыкания и потерь холостого хода. Нагрев масла в трансформаторе обусловлен потерями мощности в трансформаторе, которые равны количеству теплоты, которую необходимо отвести для обеспечения нормальной работы трансформатора.

Потери активной мощности состоят из двух составляющих:

- 1) потерь, идущих на нагревание обмоток трансформатора ΔP , зависящих от тока нагрузки,
- 2) потерь, идущих на нагревание стали ΔP_{CT} , не зависящих от тока нагрузки.

Потери мощности, идущие на нагрев обмоток трансформатора:

$$\Delta P = 3I^2 R_T = 3R_T \left[\frac{S}{\sqrt{3}U} \right]^2 = \frac{R_T S^2}{U^2} = \frac{R_T (P_n^2 + Q_T^2)}{U^2} \quad (3.1)$$

При этом полные активные потери:

$$\Delta P_T = \Delta P + \Delta P_{CT} = R_T \frac{(P^2 + Q^2)}{U^2} + \Delta P_{CT} \quad (3.2)$$

где R_T - активное сопротивление (Ом) обмоток трансформатора, определяемое по величине потерь в меди ΔP_x (кВт), мощности трансформатора $S_{НОМ}$ (кВА), номинальному напряжению $U_{НОМ}$ (кВ) обмотки трансформатора:

$$R_T = \frac{\Delta P_M U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}^2} \quad (3.3)$$

С помощью каталожных данных потери мощности в трансформаторах можно определить иначе. Если даны потери короткого замыкания $\Delta P_{M,НОМ}$ соответствующие потерям в меди при номинальной нагрузке трансформатора $S_{НОМ}$, и известна его фактическая загрузка S , то активные потери:

$$\Delta P_T = \Delta P_M + \Delta P_{CT} = \Delta P_{M,НОМ} \left(\frac{S}{S_{НОМ}} \right)^2 + \Delta P_{CT} = \Delta P_{M,НОМ} K_3^2 + \Delta P_{CT} \quad (3.4)$$

где K_3 - коэффициент загрузки трансформатора.

Активное сопротивление обмоток трансформатора определяют по известным потерям мощности в меди (в обмотках) трансформатора ΔP_M кВт при его номинальной нагрузке:

$$\Delta P_M = 3 \cdot I_{T,НОМ}^2 \cdot r_T \cdot 10^{-3} = \frac{S_{T,НОМ}^2 [\text{кВа}^2] \cdot r_T [\text{Ом}]}{10^3 \cdot U_{T,НОМ}^2 [\text{кВ}^2]}, \quad (3.5)$$

откуда

$$r_T = \frac{\Delta P_M [\text{кВт}] \cdot U_{T,НОМ}^2 [\text{кВ}^2] \cdot 10^3}{S_{T,НОМ}^2 [\text{кВа}^2]}, \quad (3.6)$$

В практических расчетах потери мощности в меди (в обмотках) трансформатора при его номинальной нагрузке принимают равными потерям короткого замыкания при номинальном токе трансформатора, т. е. $\Delta P_M \approx \Delta P_K$.

В Таблице 3.1 представлены основные характеристики силовых трансформаторов СШГЭС.

Таблица 3.1 - Характеристики трансформатора ОРЦ-533000/500-У1:

Номинальная мощность, кВА	533000
Номинальное напряжение, кВ	
ВН	$525/\sqrt{3}$
НН1-НН2	15,75-15,75
Номинальный ток, А	
ВН	1758,5
НН1-НН2	16921-16921
Напряжение короткого замыкания, %	13,5±10 %
Потери холостого хода, кВт	200+15 %
Потери короткого замыкания, кВт	1180+10 %
Полная масса, т	311
Масса масла, т	43,8

Для расчёта потерь в трансформаторе можно использовать формулу 3.7: Значение K_3 принято согласно Рисунку 3.1.

$$\Delta P_T = \Delta P_M + \Delta P_{CT} = \Delta P_{M,НОМ} \cdot \left(\frac{S}{S_{НОМ}} \right)^2 + \Delta P_{CT} = \Delta P_{M,НОМ} K_3^2 + \Delta P_{CT} \quad (3.7)$$

$$\Delta P_T = \Delta P_{M,НОМ} \cdot K_3^2 + \Delta P_{CT} \approx P_K \cdot K_3^2 + \Delta P_{CT} \quad (3.8)$$

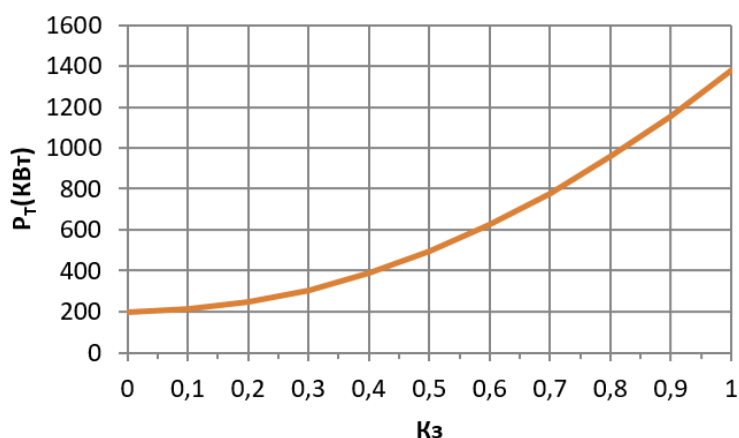


Рисунок 3.1 – Зависимость потерь трансформатора от коэффициента загрузки K_3

3.2 Расчет охлаждения трансформатора ОРЦ-533000/500 У1

Эффективным способом увеличения отвода тепла от трансформатора является применение водомасляных охладителей. Это трубчатый охладитель, в трубках движется вода, а в пространстве между трубами навстречу воде под действием насоса движется масло.

Такая система охлаждения состоит из одного или нескольких водяных маслоохладителей, электронасосов, трубопровода, аппаратов для контроля работы установки и защитных устройств. Вся система устанавливается в закрытом помещении с температурой в зимнее время не ниже 0°С во избежание замерзания воды. Циркуляция масла осуществляется центробежными насосами консольного типа серии К, соединенными при помощи муфты с валом электродвигателя. Горячее масло поступает из верхней части бака трансформатора, перекачивается насосом через маслоохладитель, охлаждается в нем и поступает в нижнюю часть бака. Входной и выходной патрубки маслопровода располагаются на трансформаторе «по диагонали» для того, чтобы вовлечь в циркуляцию большой объем масла трансформатора. Для того чтобы перекачать масло через охладитель, а, следовательно, преодолеть его сопротивление, а также сопротивление всей системы, насос устанавливается перед охладителем, т. е. напорный патрубок насоса обращен к маслоохладителю. Это обстоятельство также позволяет создать превышение давления масла в маслоохладителе над давлением воды в нем, чтобы в случае образования в трубках маслоохладителя небольших, так называемых «волосяных» трещин исключить возможность попадания воды в масло.

Система охлаждения блочных трансформаторов СШГЭС типа OFWF предназначена для отвода тепловых потерь трансформатора блока и состоит (на каждой фазе) из:

- 3-х маслоохладителей (2 рабочих, 1 резервного) типа МО-53-4-1;
- 3-х электронасосов (2 рабочих, 1 резервного) типа 1ТЭ 100/20;
- пускового электронасоса типа 1ТЭ-100/15;
- патрубков забора горячего масла из верхней части бака трансформатора;
- патрубков нагнетания охлажденного масла в нижнюю часть бака трансформатора.

Структурная схема охлаждения трансформатора показана в Приложении Б.

Трансформаторные насосы 1ТЭ 100/15, 1ТЭ 100/20 являются центробежными герметичными трансформаторными электронасосами предназначенными для перекачивания трансформаторных масел в системах охлаждения силовых трансформаторных установок. Работают в продолжительном режиме от 3-х фазной сети переменного тока при температуре 80°С. Допускается кратковременный режим работы до 2 часов при повышении температуры масла до 95°С. Насосы рассчитаны на давление трансформаторного масла во внутренней полости не более 0,4 мПа (4 кгс/см²). Должны включаться

в электрическую сеть при температуре масла не ниже -25°C . Разрез электронасоса представлен на Рисунке 3.2.

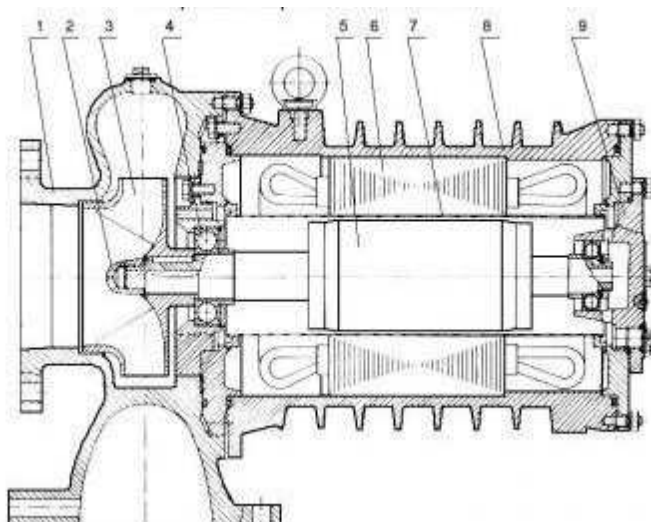


Рисунок 3.2 - Разрез электронасоса типа ТЭ

Основные детали насоса: 1 - корпус насоса с патрубками; 2 - гайка рабочего колеса; 3 - рабочее колесо; 4 – подшипник; 5 – ротор; 6 – статор; 7 – гильза; 8 - корпус электродвигателя; 9 - подшипниковый щит.

Основные технические параметры маслонасосов, установленных на СШГЭС представлены в Таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Основные технические параметры маслонасосов

Тип	Расход, м ³ /ч	Напор, м	Мощность, кВт
Насос 1ТЭ 100/15	100	15	7,5
Насос 1ТЭ 100/20	100	20	7,5

Трансформаторные насосы представляют собой единый агрегат, состоящий из одноступенчатого центробежного насоса и асинхронного короткозамкнутого экранированного электродвигателя. Герметичное исполнение насосов ТЭ полностью исключает утечку масла в окружающую среду. Режим работы насосов серии ТЭ — продолжительный. Средний срок службы до капитального ремонта — не менее 12 лет.

Маслоохладители типа МО-53-4 горизонтального типа предназначены для охлаждения водой трансформаторного масла стационарных силовых трансформаторов системы охлаждения «Ц». Вид маслоохладителя представлен на Рисунке 3.3.

Маслоохладители системы охлаждения блочных трансформаторов СШГЭС типа МО-53-4-1 имеют технические характеристики, представленные в Таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Технические характеристики маслоохладителей типа МО-53-4-1

Номинальная мощность, кВт поверхности,	Площадь теплопроводящей поверхности, м ²	Температура охлаждающей воды, °С, не более	Температура масла на входе, °С, не более	Расход воды, м ³ /час, среднее значение	Расход масла, м ³ /час, среднее значение	Рабочее давление воды МПа	Число ходов через секцию	Испытательное давление в течение 30 мин МПа	Масса, кг
950	53	33	75	70	100	0,4	4	0,75	2040

Тепловой поток при повышении температуры масла над водой на входе в маслоохладитель 40 °С - 950 кВт, при расходе масла через маслоохладитель 100 м³/час и воды 72 м³/час. Гидравлическое сопротивление по воде 0,01 МПа. Вид маслонасоса сбоку представлен на Рисунке 3.3.

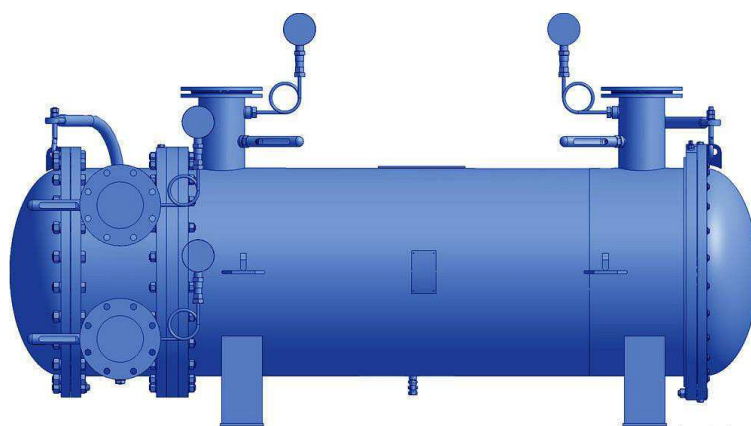


Рисунок 3.3 – Водяной маслоохладитель МО-53-4-1

Основой водяного маслоохладителя МО является система труб с оребрением (трубный пучок), помещенная в корпус. Водяные камеры охладителя оснащены патрубками для подвода и вывода воды. Имеются петли для подъема и транспортировки. Принцип работы маслоохладителя МО, как и любого теплообменника, заключается в передаче тепла от более нагретой субстанции, к менее нагретой. В данном случае – от масла к воде. Вода, поступающая через входной патрубок, проходит несколько циклов, охлаждая масло, и выходит через отводящий патрубок. Благодаря системе ребер площадь теплообмена значительно увеличена, что делает работу маслоохладителя эффективной.

Расчет системы водо-масляного охлаждения трансформаторов, заключается в том, чтобы по заданной величине потерь трансформатора ΔP_{τ} , кВт

и T_{B1} — температуры входящей в маслоохладитель воды, принятой равной 25°C , определить следующие величины: T_{M1} ; T_{M2} ; T_{B1} ; T_{B2} ; ΔT_M и ΔT_B , где T_{M1} ($T_{всм}$) — температура масла верхних слоёв или входящего в маслоохладитель масла, $^{\circ}\text{C}$; T_{M2} ($T_{нсм}$) — температура масла нижних слоёв или выходящего из маслоохладителя масла, $^{\circ}\text{C}$; T_{B1} — температура входящей в маслоохладитель воды, $^{\circ}\text{C}$; T_{B2} — температура выходящей из маслоохладителя воды, $^{\circ}\text{C}$; ΔT_M — разность температур входящего и выходящего масла из маслоохладителя; ΔT_B — разность температур выходящей и входящей воды из маслоохладителя.

При тепловых расчетах по определению переданного тепла от стенки бака в атмосферу будем использовать понятия: геометрическая поверхность и эффективная теплоотдающая поверхность. Для того чтобы определить среднее превышение температуры масла над температурой окружающего воздуха при заданной системе охлаждения необходимо знать эффективную поверхность бака. При тепловых расчетах для гладких баков трансформаторов эффективная теплоотдающая поверхность приводится к эффективной поверхности и определяется по формуле:

$$S_{эф} = k_{пб} \cdot S_б + k_{пк} \cdot S_к \quad (3.9)$$

где $S_б$ — геометрическая вертикальная поверхность бака;

$k_{п.б}$ — 1,0 — коэффициент поверхности гладкой вертикальной стенки;

$S_к$ — геометрическая поверхность крышки;

$k_{п.к} = 0,75$ — коэффициент поверхности крышки, который учитывает закрытие части поверхности крышки вводами и другой арматурой.

Трансформатор ОРЦ-533000/500-У1 имеет габаритные размеры (в транспортном состоянии): длина 8690 мм; ширина 3650 мм; высота 5000 мм. Эффективная поверхность в итоге равна $147,21 \text{ м}^2$.

Следующим этапом теплового расчета бака трансформатора является определение коэффициента K - количество тепла в ваттах, отводимого с каждого квадратного метра поверхности бака трансформатора при превышении его температуры над температурой окружающей среды на 1°C . Эта величина определяется по кривой зависимости среднего превышения температуры масла над температурой воздуха от удельной тепловой нагрузки бака при естественном охлаждении.

Среднее превышение температуры масла над температурой воздуха определяется как разница между максимальным расчётным превышением температуры обмотки над температурой воздуха, равным 70°C согласно ГОСТ 401-41 (при температуре наружного воздуха равной 20°C) и расчетным превышением температуры обмотки над температурой масла. Для трансформатора ОРЦ-533000/500 У1 Принято, что при повышении температуры масла более 90°C или температуры обмотки выше 105°C , защита действует на предупредительный сигнал. Значит, принимаем, что расчетное превышение температуры обмотки над температурой масла составляет 15°C .

Соответственно величина превышения температуры масла над температурой воздуха равна 55 °С, а удельная величина удельной тепловой нагрузки составит 800 Вт/м². График, по которому определено значение, представлен на Рисунке 3.4.

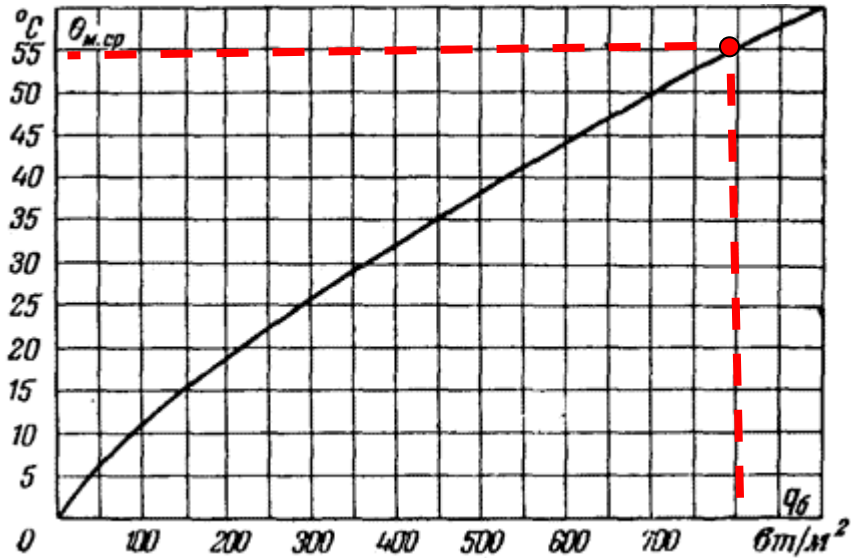


Рисунок 3.4 - Кривая зависимости среднего превышения температуры масла над температурой воздуха от удельной тепловой нагрузки бака при естественном охлаждении.

Соответственно коэффициент К - количество тепла в ваттах, отводимого с каждого квадратного метра поверхности бака трансформатора при превышении его температуры над температурой окружающей среды на 1°С. будет равен:

$$K = \frac{800}{55} = 14,5 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}; \quad (3.10)$$

Далее можно определить количество тепла отводимого от поверхности бака за 1 час в зависимости от температуры верхних слоёв масла ($T_{всм}$) и температуры воздуха ($T_{нв}$) на 1 градус разницы температуры:

$$P_{\phi} = K \cdot S_{\phi} \cdot (T_{всм} - T_{нв}) = 14,5 \cdot 147,21 \cdot 1 = (T_{всм} - T_{нв}) \cdot 2134,5 Вт \quad (3.11)$$

Зависимость количество тепла отводимого с поверхности бака от температуры верхних слоёв масла приведена на Рисунке 3.5.

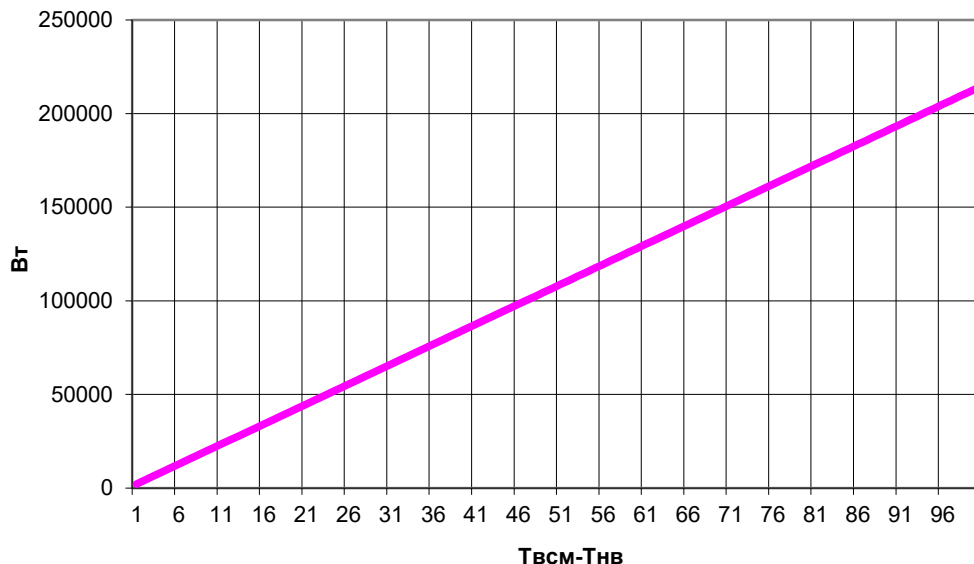


Рисунок 3.5 - Зависимость количество тепла отводимого с поверхности бака от температуры верхних слоёв масла

Теплопередача в маслоохладителях и от стенок бака трансформатора за 1 ч составляет $860 \Delta P_T$ ккал ($1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 860 \text{ ккал}$). Это количество тепла отдается обмоткой трансформатора маслу, а затем поглощается водой и отводится с поверхности бака. Количество тепла – это энергия, которую масло теряет или приобретает при теплопередаче. При остывании масло будет терять некое количество теплоты, а при нагревании – поглощать. Разность температур масла до и после теплопередачи важна для расчетов.

Исходя из всего вышесказанного, мы можем определить количество поглощаемой теплоты по формуле:

$$Q = c \cdot m \cdot (T_2 - T_1), \quad (3.12)$$

где Q – количество теплоты, (Дж),

m – масса масла в трансформаторе или воды в охладителе, (кг),

$(T_2 - T_1)$ – разность между начальной и конечной температурами масла или воды (градус),

c – удельная теплоемкость воды или масла (ккал/кг·град).

Так как при работе трансформатора работают маслососы, которые непрерывно прокачивают масло через трансформатор, а через маслоохладители постоянно циркулирует вода, то в этом виде формула не может быть применена.

Для трансформаторов с системой охлаждения типа OFWF согласно [1] предлагается использовать формулу для определения баланса между количеством тепла, которое при работе выделяет трансформатор, количеством тепла, которое поглощается маслом при его нагревании и количеством тепла, выделяемым при нагревании воды в маслоохладителе:

$$860\Delta P_T = \gamma_M \cdot Q_M \cdot c_M \cdot \Delta T_M = \gamma_B \cdot Q_B \cdot c_B \cdot \Delta T_B \quad (3.13)$$

где γ_M — удельный вес масла, который при температуре масла 40 °С будет равен 868,2 кг/м³.

$\gamma_B = 1000$ кг/м³ — удельный вес воды;

c_M — удельная теплоемкость масла, которое при температуре масла 40 °С будет равна 0,427 ккал/кг·град.

c_B — удельная теплоемкость воды, равная 1 ккал/кг- град.

Сначала решим левую часть выражения 3.13, определим разность температуры входящего и выходящего масла из маслоохладителя, зная расход масла через трансформатор. Так как количество тепла, которое выделяется при работе трансформатора должно быть равно теплу, которое будет затрачено на нагрев масла, а соответственно на повышение температуры.

$$860\Delta P_T = \gamma_M \cdot Q_M \cdot c_M \cdot \Delta T_M, \quad (3.14)$$

тогда разность температуры между верхними и нижними слоями масла в трансформаторе будет определено по формуле.

$$\Delta T_M = \frac{860 \cdot \Delta P_T}{\gamma_M \cdot Q_M \cdot c_M} = \frac{860}{868,2 \cdot 0,427 \cdot 200} \Delta P_T = 0,012 \cdot \Delta P_T, \quad (3.15)$$

где ΔT_M — разность температур входящего и выходящего масла для трансформатора при номинальном расходе масла через трансформатор при работе двух насосов 200 м³/час.

Зависимость разности температур масла на входе и выходе из трансформатора от потерь в трансформаторе представлена на Рисунке 3.6.

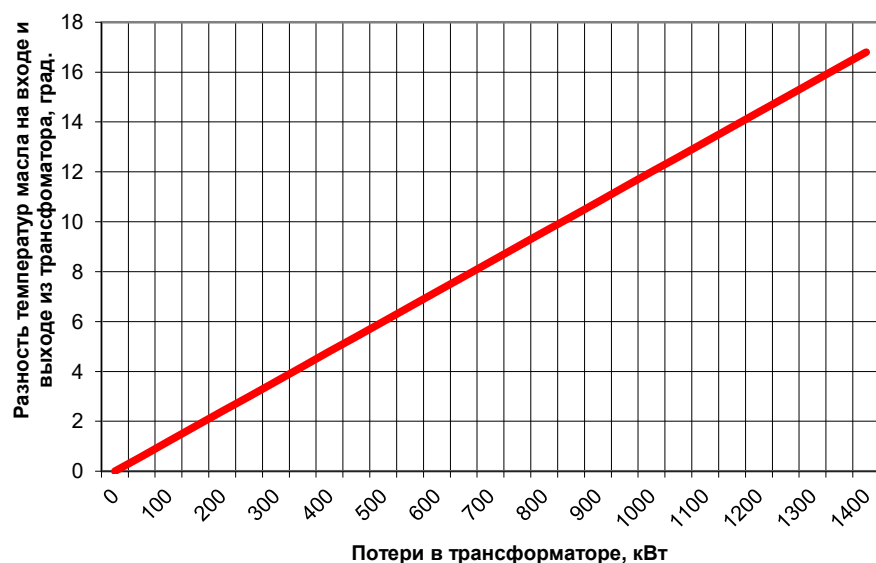


Рисунок 3.6 - Зависимость разности температур масла на входе и выходе из трансформатора от потерь в трансформаторе.

Из этой формулы видно, что 1 кВт потерь трансформатора за 1 час нагреет масло на 0,012 °С. Обратная зависимость этого выражения говорит о том, что для того чтобы нагреть масло на 1 °С необходимо 83,3 кВт потерь мощности для корректировки температуры масла при её отклонении от желаемой температуры $T_{\text{жел}}$:

$$\Delta P_{\text{кор}} = \frac{1}{0,012} = 83,3. \quad (3.16)$$

Так как на разницу температуры масла верхних и нижних слоёв в трансформаторе будет влиять количество тепла отведённого от стенок бака трансформатора, то в формулу:

$$\Delta T_M = \frac{860 \Delta P_T}{\gamma_M Q_M c_M} = \frac{860 \cdot \Delta P_T}{868,2 \cdot 0,427 \cdot 200} = 0,012 \cdot \Delta P_T \quad (3.17)$$

С учетом влияния тепла, отводимого от стенок бака:

$$\Delta T_M = \frac{860(\Delta P_T - P_{\sigma})}{\gamma_M Q_M c_M} = \frac{860 \cdot (\Delta P_T - P_{\sigma})}{868,2 \cdot 0,427 \cdot 200} = 0,012 \cdot (\Delta P_T - P_{\sigma}) \quad (3.18)$$

Далее решим правую часть выражения (11), определим разность температуры входящей и выходящей воды для маслоохладителей, зная количество тепла, которое необходимо отдать воде для поддержания теплового баланса. Так как количество тепла, которое выделяется при работе трансформатора должно быть равно теплу, которое будет затрачено на нагрев воды в маслоохладителях, а соответственно на повышение температуры, тогда:

$$860 \cdot \Delta P_T = \gamma_B \cdot Q_B \cdot c_B \cdot \Delta T_B. \quad (3.19)$$

Теперь следует рассчитать, какая будет разница температур воды на входе и выходе из маслоохладителя, при его номинальной нагрузке, равной 950 кВт и при номинальном расходе воды через маслоохладитель 72 м³/час.

Исходя из того, что номинальная мощность маслоохладителя может быть выражена формулой:

$$P_{\text{НОМ.МО}} = \gamma_B \cdot Q_B \cdot c_B \cdot \Delta T_B. \quad (3.20)$$

Из этого следует, что

$$\Delta T_B = \frac{860 \cdot P_{ном.мо}}{\gamma_B \cdot Q_B \cdot C_B} = \frac{860 \cdot P_{ном.мо}}{72 \cdot 1 \cdot 1000} = 0,012 \cdot P_{ном.мо} \quad (3.21)$$

Из проведённого расчёта видно, что один киловатт мощности маслоохладителя приведёт к разности температур воды на входе и выходе за один час на 0,012 °С.

Это утверждение доказывает правильность проведённых расчетов. Как было определено ранее, один киловатт потерь мощности в трансформаторе за час приводит к увеличению температуры на такую же величину, какую приводит работа маслоохладителя с мощностью один киловатт к понижению температуры -0,012 °С.

Если в работе будет два маслоохладителя, а мощность будет отличной от номинальной, то

$$\Delta T_B^{11} = \frac{860 \cdot 0,5 \cdot P_{ном.мо}}{\gamma_B \cdot Q_B \cdot C_B} = \frac{860 \cdot 0,5 \cdot P_{мо}}{72 \cdot 1 \cdot 1000} = 0,006 \cdot P_{мо}, \quad (3.22)$$

что ровно в два раза меньше разницы температур масла на входе и выходе из маслоохладителя. При работе трёх маслоохладителей с нагрузкой, отличной от номинальной,

$$\Delta T_B^{11} = \frac{860 \cdot 0,33 \cdot P_{ном.мо}}{\gamma_B \cdot Q_B \cdot C_B} = \frac{860 \cdot 0,33 \cdot P_{мо}}{72 \cdot 1 \cdot 1000} = 0,004 \cdot P_{мо}, \quad (3.23)$$

то есть в три раза меньше разницы температур масла на входе и выходе из маслоохладителя.

Количество теплоты, которое передается в маслоохладителе от горячего масла воде, определяется по основному уравнению теплопередачи, согласно [9]:

$$P_{мо} = F \cdot K \cdot \Delta T_{ср}, \quad (3.24)$$

где F — площадь теплообмена в маслоохладителе, м². Для маслоохладителя МО-53-4-1 составляет 53 м²;

K — коэффициент теплопередачи, Вт/м² К;

$\Delta T_{ср}$ — средняя разность температуры теплоносителей, масла и воды.

Для проведения дальнейших расчётов необходимо определить коэффициент теплопроводности, величину, которая будет постоянной при разных нагрузках маслоохладителей. Для определения коэффициента теплопроводности следует определить среднюю разность температур теплоносителей для номинального режима маслоохладителя.

Для встречного потока теплоносителей в теплообменниках, а именно такой способ охлаждения используется в маслоохладителях, среднеарифметическая разность температур определяется по формуле:

$$\Delta T_{CP} = \frac{(T_{M1} - T_{B2}) + (T_{M2} - T_{B1})}{2}. \quad (3.25)$$

Процесс теплообмена в маслоохладителях представлен на Рисунке 3.7.:

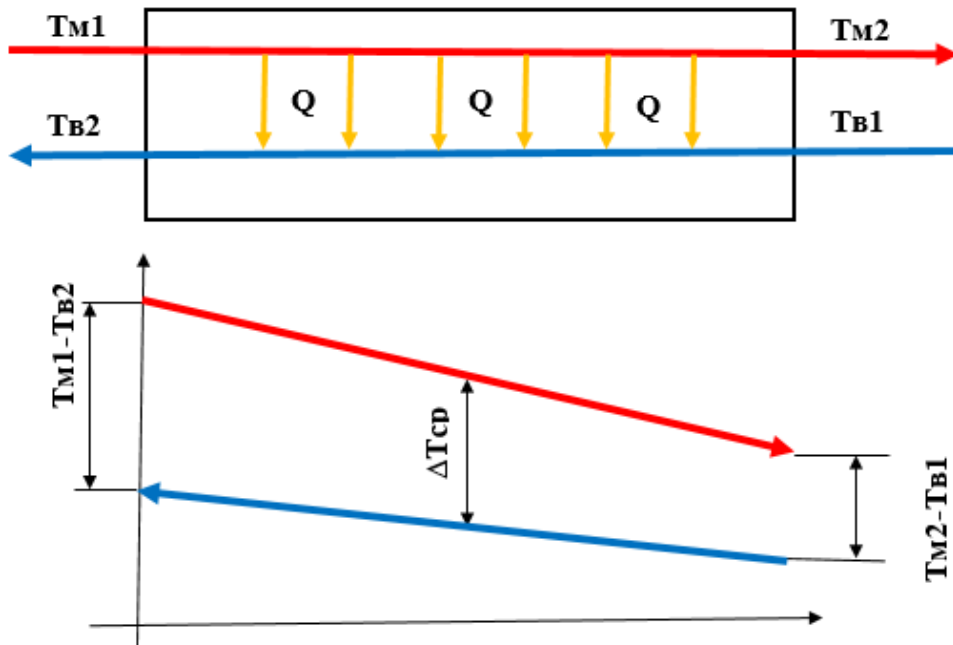


Рисунок 3.7 - Процесс теплообмена в маслоохладителях

Как видно масло и вода в маслоохладителе двигаются навстречу друг другу, при входе в маслоохладитель горячее масло сначала встречается с подогретой водой, проходя через маслоохладитель, на выходе охлаждается водой с самой низкой температурой.

Разницу температуры масла на входе и выходе из маслоохладителя для номинального режима маслоохладителя без учета влияния тепла, отведенного от стенок бака, определим по ранее выведенному выражению:

$$\Delta T_M = 0,012 \cdot \Delta P_T = 0,012 \cdot 950 = 11,4^\circ\text{C} \quad (3.26)$$

Используем ранее рассчитанную разницу температур воды на выходе и входе их из маслоохладителя для номинального режима $\Delta T_B = 11,3^\circ\text{C}$.

$$\Delta T_{CP} = \frac{2T_{M1} + \Delta T_M - 2T_{B1} - \Delta T_B}{2} = \frac{2T_{M1} - 2T_{B1} + 11 - 11}{2} = T_{M1} - T_{B1} \quad (3.27)$$

Исходя из того, что для маслоохладителей МО 53-4 разница температур масла и воды на входе для номинального режима равна 40°C , получим, что $\Delta T_{CP} = 40^\circ\text{C}$.

Рассчитав для номинального режима маслоохладителя среднюю разницу температур масла и воды можно определить средний коэффициент теплопередачи K . Так как $P_{MO} = F \cdot K \cdot \Delta T_{cp}$, то

$$K = \frac{P_{MO}}{F \cdot \Delta T_{cp}} = \frac{950}{53 \cdot 40} = 0,448 \text{ кВт/м}^2\text{К} \quad (3.28)$$

Полученная величина коэффициента теплопередачи K в маслоохладители соответствует справочным значениям.

Далее для расчёта режимов работы маслоохладителей отличных от номинальных необходимо будет находить среднюю разницу температур масла и воды, которая будет напрямую соответствовать текущей мощности маслоохладителя:

$$\Delta T_{cp} = \frac{P_{MO}}{F \cdot K} = \frac{P_{MO}}{53 \cdot 0,448} = \frac{P_{MO}}{23,7} \quad (3.29)$$

После того, как будет определено значение средней температуры, можно найти значение разницы температуры воды на входе и выходе из маслоохладителя по известной температуре воды на входе в маслоохладитель, разности температур масла на входе и выходе в маслоохладитель и известной температуре верхних слоёв масла в трансформаторе. Так как ранее мы приняли, что $\Delta T_{cp} = \frac{2T_{M1} + \Delta T_M - 2T_{B1} - \Delta T_B}{2}$, тогда

$$T_{M1} = T_{B1} + 0,5 \cdot \Delta T_B + \Delta T_{cp} - 0,5 \cdot \Delta T_M. \quad (3.30)$$

Изобразим на Рисунке 3.8 как будут изменяться температуры воды на выходе из маслоохладителя и температуры масла на входе и выходе из маслоохладителя при постоянной температуре воды на входе в маслоохладитель, условно принятой 15°C , и номинальном расходе воды через маслоохладитель, равном $72 \text{ м}^3/\text{час}$, не учитывая влияния температуры наружного воздуха на дополнительное охлаждение масла в баке трансформатора.

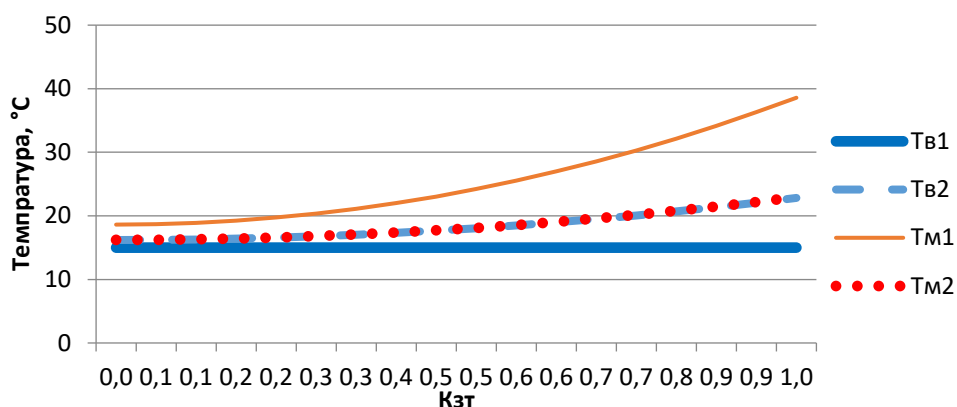


Рисунок 3.8 – Зависимость температур от коэффициента загрузки

Из графика видно, что при постоянной температуре воды на входе в маслоохладители (в работе 2 маслоохладителя) $T_{в1}=15$ °С и номинальном расходе воды через маслоохладители $72 \text{ м}^3/\text{час}$ температура масла верхних слоёв масла в трансформаторе будет изменяться от 19 °С при холостом ходе трансформатора до 39 °С при коэффициенте загрузки трансформатора равном единице.

Опыт эксплуатации показывает, что при работе трансформатора на холостом ходу температура воды на входе в маслоохладитель может быть равна $5-10$ °С. При температуре воды равной 10 °С во время работы с коэффициентом загрузки, близким к нулю, температура масла верхних слоёв снизится ниже 15 °С, что приведёт к отключению рабочих насосов и включению пускового насоса. Такой режим работы электродвигателей маслонасосом крайне нежелателен, так как электродвигатели при таких температурах масла работают с максимальной токовой нагрузкой, и как показывает опыт их эксплуатации, начинают быстро выходить из строя, тем самым снижая надёжность трансформатора.

Опыт эксплуатации на СШГЭС трансформаторов ОРЦ-533000/500-У1 показал, температура верхних слоёв масла в трансформаторе должна быть в пределах от 35 до 45 °С. Такой тепловой режим достигается ручным регулированием температуры за счёт изменения расхода воды через маслоохладители.

Расчёт необходимого расхода воды через маслоохладители для поддержания заданного уровня температуры верхних слоёв масла в трансформаторе будем проводить, приняв, что температура воды на входе в маслоохладители и температура верхних слоёв масла в трансформаторе будут постоянными.

Ранее мы использовали формулу (3.30) для расчёта значений температуры верхних слоёв масла в трансформаторе по известным значениям температуры воды на входе в маслоохладители $T_{в1}$, по разнице температур масла и воды на входе и выходе из маслоохладителя ΔT_m и ΔT_v , по средней разнице температур в маслоохладителе $\Delta T_{ср}$. Теперь решим обратную задачу, по заданному значению верхних слоёв масла в трансформаторе $T_{м1}$, условно принятому равным 40 °С, по рассчитанной разнице температур масла на входе и выходе из маслоохладителя ΔT_m , по рассчитанной средней разнице температур в маслоохладителе $\Delta T_{ср}$, по

известному значению температуры воды на входе в маслоохладители T_{B1} , условно принятой как и в предыдущем случае 15°C , будем находить значение разницы температур и воды на входе и выходе из маслоохладителя ΔT_B :

$$T_B = 2 \cdot T_{M1} - 2 \cdot T_{B1} - 2 \cdot \Delta T_{cp} + \Delta T_M. \quad (3.31)$$

Далее согласно формуле (3.23) выразим расход воды через маслоохладители Q_B через мощность маслоохладителя P_{MO} и разницу температур воды на входе и выходе из маслоохладителя ΔT_B :

$$Q_B = \frac{860 \cdot P_{MO}}{\gamma_B \cdot \Delta T_B \cdot c_B} = \frac{860 \cdot P_{MO}}{1000 \cdot \Delta T_B} = \frac{0,86 \cdot P_{MO}}{\Delta T_B}. \quad (3.32)$$

Отражаем на графике результат расчёта на Рисунке 3.9:

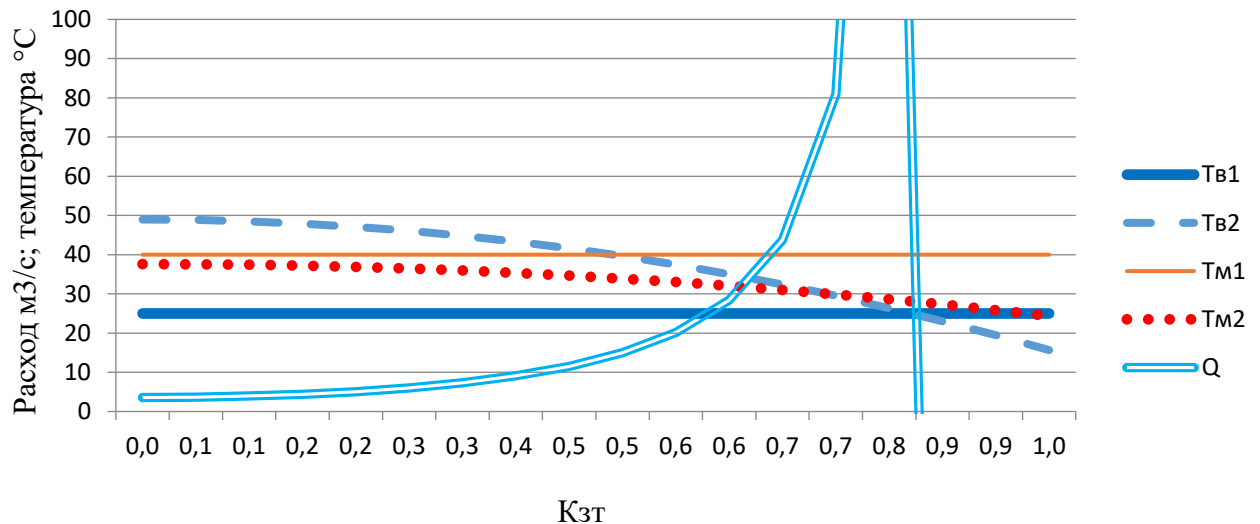


Рисунок 3.9 - Зависимость расхода воды через маслоохладитель от коэффициента загрузки трансформатора. Вариант расчета I

На графике видно, что для довольно широкого диапазона ожидаемых температур верхних слоёв масла в трансформаторе, расчётные значения разницы температур входящей и выходящей воды из маслоохладителей не могут быть реальными с точки зрения теплотехники. Температура воды на выходе из маслоохладителя не может быть выше температуры масла на входе в маслоохладитель. Температура воды на выходе из маслоохладителя не может быть ниже температуры воде на входе в маслоохладитель. Расходы воды через маслоохладители имеют нереальные величины.

Из полученного результата делаем вывод, что для определённых значений температуры воды на входе в маслоохладители T_{B1} , температуры наружного воздуха $T_{нв}$ и коэффициентов загрузки трансформатора K_3 температура масла на

входе в маслоохладитель T_{M1} не может быть выше или ниже определённого значения.

Для расчёта величины расхода воды через маслоохладители рассчитаем значение разницы температур входящей и выходящей воды для маслоохладителей по формуле:

$$\Delta T_B = 2 \cdot T_{M1} - 2 \cdot T_{B1} - 2 \cdot \Delta T_{CP} + \Delta T_M. \quad (3.33)$$

Для определения расхода воды принимается разница температур входящей и выходящей воды маслоохладителя ΔT_B равной разнице температур воды на входе в маслоохладители T_{B1} и температуру масла на входе в маслоохладители T_{M1} ($T_{M1} - T_{B1}$). Определяем реально возможную температуру масла на входе в маслоохладители из выражения:

$$T_{M1} - T_{B1} = 2 \cdot T_{M1} - 2 \cdot T_{B1} - 2 \cdot \Delta T_{CP} + \Delta T_M. \quad (3.34)$$

Получим:

$$T_{M1} = T_{B1} + 2 \cdot \Delta T_{CP} - \Delta T_M. \quad (3.35)$$

Это значение будет максимальным для возможной температуры масла, входящей в маслоохладитель, при условии сохранения теплового баланса, назовём его $T_{M1, \text{макс}}$.

Далее, если по результатам расчёта величина расчётной температуры масла на входе в маслоохладитель меньше температуры на входе в маслоохладитель желаемой, $T_{M1, \text{рас}} < T_{M1, \text{жел}}$, то далее при расчётах принимаем расчётную величину. Как только расчётное значение будет выше желаемой температуры, принимаем желаемую температуру. Когда желаемая температура масла достигает значения температуры масла верхних слоёв рассчитанного для номинального расхода воды через маслоохладитель, то далее при увеличении нагрузки расход воды принимается эта температура.

Для определённой температуры воды на входе в маслоохладители и температуре наружного воздуха величины минимально возможной и максимально возможных температур масла образуют коридор, в границах которого температура масла может изменяться. Изобразим эту зависимость на Рисунке 3.10.

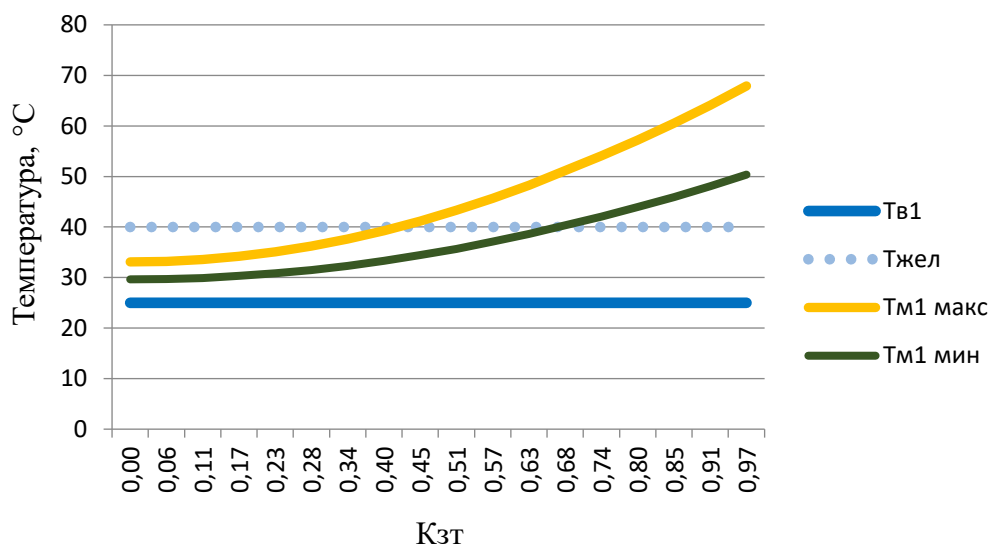


Рисунок 3.10 – Зависимость температур от коэффициента загрузки

Результаты расчёта для желаемой температуры масла на входе в маслоохладитель $T_{м1.жел}$ равной $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, температуры воды на входе в маслоохладитель $T_{в1}$ равной $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, приводим на Рисунке 3.11.

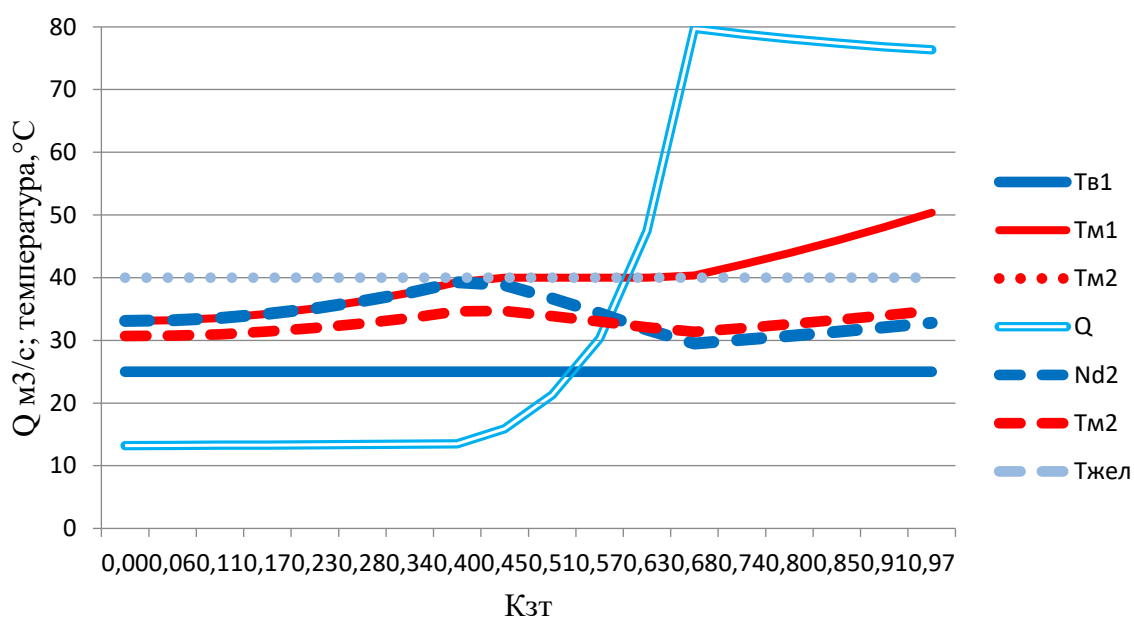


Рисунок 3.11 – Зависимость расхода воды через маслоохладитель от коэффициента загрузки трансформатора. Вариант расчета II

На графике видно, что при рассчитанном значении расхода воды через маслоохладители вода успевает нагреться до температуры масла на входе в маслоохладители, и такой режим поддерживается около половины диапазона нагрузки трансформатора.

Для разных значений коэффициентов загрузки трансформатора, температуры верхних слоёв масла в трансформаторе и температур воды на входе

в маслоохладители рассчитываемый расход воды через маслоохладители будет принимать свои значения.

Далее можно проводить расчёт, который позволит определить открытие дисковых затворов на выходе из маслоохладителей для необходимого расхода охлаждающей воды.

На маслоохладителях системы охлаждения трансформаторов СШГЭС вода подаётся к маслоохладителям и отводится от них в нижний бьеф через дисковые затворы «Арматэк». Их вид представлен на Рисунке 3.12. Дисковые затворы позволяют установить необходимый расход воды, благодаря возможности изменять угол открытия диска затвора от 0 до 90 градусов. Расход воды регулируется затвором, установленным на выходе из маслоохладителя. Затвор, установленный на входе в маслоохладитель, открывается полностью после подачи напряжения на трансформатор при условии положительной температуры масла, или после прогрева масла в трансформаторе до положительной температуры.



Рисунок 3.12– Дисковый затвор «Арматэк»

Угол открытия затвора для обеспечения необходимого расхода определяется по расходной характеристике дисковых затворов.

Для определения открытия затвора следует применить расходные характеристики затворов «Арматэк», установленных на магистрали ТВС на выходе из маслоохладителей. Расходные характеристики представлены на Рисунке 3.13.

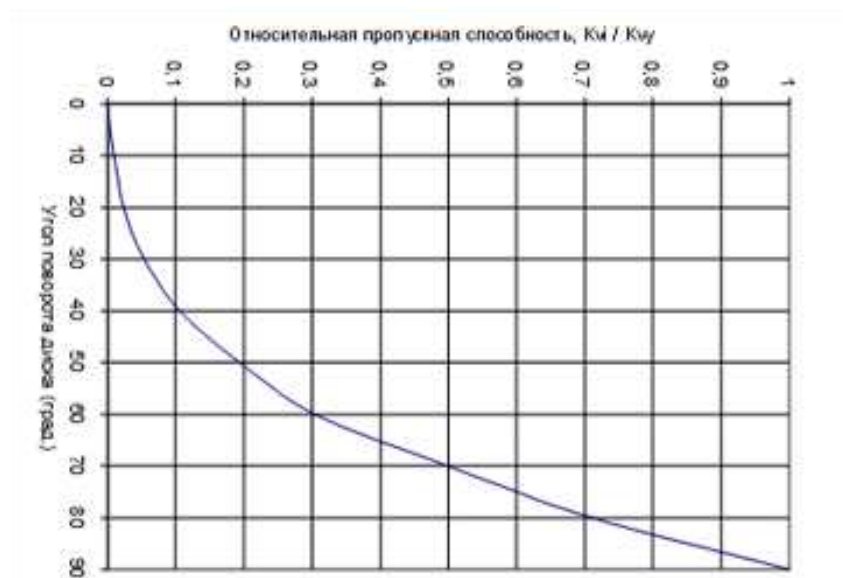


Рисунок 3.13 - Расходная характеристика дисковых затворов

Из расходной характеристики дисковых затворов видно, что расход увеличивается в начале открытия затвора плавно, но при дальнейшем повороте диска начинается увеличиваться более интенсивно.

Зависимость изменения расхода от угла открытия не прямолинейная, и для использования её в расчётах по определению угла открытия для обеспечения необходимого расхода требуется преобразование зависимости в таблицу. В таблицу внесём значения расхода при разном открытии затвора, принимая, что номинальный расход через затвор будет равен номинальному расходу воды через теплообменник 72 м³/час. Будем считать, что открытие затворов будет иметь девять фиксированных положений. В Таблице 3.4 указаны расходы воды для каждого открытия.

Таблица 3.4 – Открытия диска затвора

Номер положения открытия диска, №пд	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Угол открытия диска затвора (град)	40	50	60	65	70	75	80	83	86	90
Диапазон расхода воды (м ³ /час)	0÷7	7÷14	14÷21	21÷28	28÷35	35÷42	42÷49	49÷56	56÷63	63÷72

Процесс регулирования работы маслоохладителей будет сводиться к определению угла открытия дисковых затворов на выходе из маслоохладителей

по известным значениям температуры вода на входе в маслоохладитель, температуре наружного воздуха, по току на стороне высшего напряжения трансформатора, по вводимому в ручном режиме количеству маслоохладителей, нижнего и верхнего допустимых значений температур верхних слоёв масла трансформатора.

Управление затвором на выходе ТВС из маслоохладителей реализуется установленными на дисковые затворы электроприводами ПС-102. Их вид представлен на Рисунке 3.14. Существенным отличием конструкции которых является то, что они адаптированы специально под затворы и имеют встроенный позиционер, который изменяет (позиционирует) положения диска затвора в зависимости от задающего токового сигнала контроллера. Токковый сигнал на входе в позиционер может изменяться от 4 до 20 мА. Решения задачи по автоматизации теплового режима трансформатора может быть реализована при применении цифро-аналогового преобразователя, который должен будет преобразовывать цифровой код, соответствующий необходимой величине открытия затвора, в аналоговый сигнал, соответствующий открытию затвора. Позиционер непрерывно регистрирует задающий сигнал и путем сравнения с действующим положением диска затвора переводит диск в необходимое положение.



Рисунок 3.14- Электропривод ПС-102

Расчёт должен проводиться по алгоритму, представленному в Приложении В.1-В.3:

1. Начало. Алгоритм автоматического регулирования температуры запускается вручную персоналом после ввода трансформатора в работу. На момент пуска алгоритма температура верхних слоёв масла должна быть выше 15⁰С, для того, чтобы рабочие насосы включились, а пусковой насос отключился, затворы системы технического водоснабжения на входе в маслоохладители открылись. Персонал должен через маслоуловители, установленные на выходе из маслоохладителей трубопроводов технического водоснабжения удалить

воздух из внутренних полостей маслоохладителей, по которым циркулирует вода.

2. Ручной ввод. Персонал «вручную» вводит нормальную температуру верхних слоёв масла ($T_{всм. жел}$), и количество введённых в работу маслоохладителей ($N_{мо}$).

3. Запуск счётчика цикла. Цикл запуска цикла алгоритма выбирается так, чтобы за это время всё масло в трансформаторе было перекачено насосами через маслоохладители. Так как в трансформаторе 43,8 тонн масла, а удельный вес масла, при температуре масла 40°C равен $868,2 \text{ кг/м}^3$ объём масла составит $50,4 \text{ м}^3$. При производительности двух маслонасосов $200 \text{ м}^3/\text{час}$ всё масло, которое находится в трансформаторе, будет перекачено через маслоохладители за $0,28$ часа. Цикл счётчика принимается равным 15 минут.

4. Автоматический ввод. СУМТО автоматически из АСУ ТП запрашивает текущее значение тока на стороне высшего напряжения трансформатора ($I_{вн}$), температуры наружного воздуха ($T_{нв}$), температуры верхних слоёв масла в трансформаторе ($T_{всм}$) и температуры воды в системе технического водоснабжения на входе в маслоохладитель ($T_{в1}$).

5. Расчёт. Автоматически рассчитывается коэффициент загрузки трансформатора по формуле:

$$K_{зт} = \frac{I_{вн}}{1758,5}. \quad (3.36)$$

6. Расчёт. Автоматически рассчитывается величина потерь трансформатора за цикл (15 минут) по формуле:

$$\Delta P_T = \frac{1180 \cdot k_3^2 + 200}{4}. \quad (3.37)$$

7. Автоматический вывод. СУМТО автоматически выводит и сохраняет величину потерь трансформатора за цикл ΔP_T (кВт).

8. Расчёт. Автоматически рассчитывается количество тепла, отведённое за цикл стенками бака трансформатора по формуле

$$P_{\delta} = (T_{всм} - T_{нв}) \cdot 0,53. \quad (3.38)$$

9. Автоматический вывод. СУМТО автоматически выводит и сохраняет величину тепла, отведённого за цикл стенками бака трансформатора, P_{δ} (кВт).

10. Расчёт. Автоматически рассчитывается разность температуры между верхними и нижними слоями масла в трансформаторе по формуле:

$$\Delta T_M = 0,012 \cdot (\Delta P_T - P_{\delta}). \quad (3.39)$$

11. Автоматический вывод. СУМТО автоматически выводит и сохраняет величину разности температуры между верхними и нижними слоями масла в трансформаторе, ΔT_m (град).

12. Сравнение. СУМТО сравнивает температуру верхних слоёв масла трансформатора ($T_{ВСМ}$) с расчётной температурой масла на входе в маслоохладители в предыдущем цикле расчёта (допустимое отклонение температуры принимается условно равным $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и при необходимости может быть откорректировано):

$$T_{M1.расч.} - 5 < T_{ВСМ} < T_{M1.расч.} + 5.$$

13. Если утверждение верно, то принимается, что мощность необходимая для корректировки температуры масла равна нулю.

Если нет, то СУМТО рассчитывает мощность, необходимую для корректировки температуры масла.

Расчёт. Автоматически рассчитывается мощность, необходимая для корректировки температуры масла верхних слоёв трансформатора за цикл (15 минут) по формуле:

$$P_{кор} = (T_{ВСМ} - T_{M1.расч.}) \cdot 20,8. \quad (3.40)$$

14. Автоматический вывод. СУМТО автоматически выводит и сохраняет мощность, необходимую для корректировки температуры масла верхних слоёв трансформатора за цикл, $P_{кор}$ (кВт).

15. Расчёт. Автоматически рассчитывается мощность, которую должны отвести маслоохладители за цикл по формуле:

$$P_{МО} = \Delta P_T - P_b + P_{КОР}. \quad (3.41)$$

16. Расчёт. Автоматически рассчитывается мощность, которую должен отвести один маслоохладитель за цикл (15 минут), по формуле:

$$P_{МО}^1 = \frac{P_{МО}}{n_{МО}}. \quad (3.42)$$

17. Автоматический вывод. СУМТО автоматически выводит и сохраняет мощность, которую должны отвести один маслоохладитель за цикл, $P_{МО}^1$ (кВт).

18. Расчёт. Автоматически рассчитывается средняя разница температур масла и воды, которая соответствует текущей мощности одного маслоохладителя:

$$\Delta T_{cp} = \frac{P_{MO}^1}{23,7}. \quad (3.43)$$

19. Автоматический вывод. СУМТО автоматически выводит и сохраняет средняя разница температур масла и воды для одного маслоохладителя, ΔT_{cp} (град).

20. Расчёт. Автоматически рассчитывается максимально возможная температура масла на входе в маслоохладитель за цикл (15 минут) по формуле:

$$T_{M1.МАКС} = T_{B1} + 2 \cdot \Delta T_{cp} - \Delta T_M. \quad (3.44)$$

21. Расчёт. Автоматически рассчитывается минимально возможная температура масла на входе в маслоохладитель за цикл (15 минут):

$$T_{M1.МИН} = T_{B1} + 0,5 \cdot \left(\frac{\Delta T_M}{n_{MO}} \right) + \Delta T_{cp} - 0,5 \cdot \Delta T_M. \quad (3.45)$$

22. Сравнение. СУМТО сравнивает рассчитанную максимально возможную температуру масла на входе в маслоохладитель ($T_{M1.МАКС}$) с желаемой температурой масла и минимальной температурой масла на входе в маслоохладителя:

$$T_{M1.МАКС} < T_{M1.ЖЕЛ}.$$

23. Если выражение верно, то для дальнейшего расчёта принимается, что температура масла на входе в маслоохладитель равна расчетному максимальному значению:

$$T_{M1} = T_{M1.МАКС}.$$

Разность температуры воды на входе и выходе из маслоохладителя определяется по формуле:

$$\Delta T_B = T_{M1} - T_{B1}. \quad (3.46)$$

24. Если нет, то СУМТО сравнивает желаемую температуру масла с минимальной температурой масла на входе в маслоохладителя

$$T_{M1.ЖЕЛ} > T_{M1.МИН}.$$

25. Если выражение верно, то для дальнейшего расчёта принимается, что температура масла на входе в маслоохладитель должна быть равна желаемой температуре $T_{M1.жел}$:

$$T_{M1.} = T_{M1.ЖЕЛ.}.$$

Разность температуры воды на входе и выходе из маслоохладителя определяется по формуле

26. Если нет, то для дальнейшего расчёта принимается, что температура масла на входе в маслоохладитель равна значению минимальной температуре масла на входе в маслоохладитель:

$$T_{M1.} = T_{M1.МИН.}.$$

Разница температуры между входящей и выходящей водой для маслоохладителя определяется по формуле:

$$T_{B.} = \frac{\Delta T_M}{N_{MO}}. \quad (3.47)$$

27. Расчёт. Автоматически рассчитывается расход воды через один маслоохладитель на цикл по формуле:

$$Q_B^1 = \frac{0,86 \cdot \Delta P_{MO}^1}{\Delta T_B}. \quad (3.48)$$

28. Автоматический вывод. СУМТО автоматически выводит и сохраняет расход воды через один маслоохладитель на цикл, Q_B^1 (м³/час).

29. Расчёт. Автоматически рассчитывается номер положения диска затвора, при этом берётся целая часть полученного результата:

$$N_{\text{пд}}^1 = \frac{Q_B^1}{7}. \quad (3.49)$$

30. Автоматический вывод. СУМТО автоматически выводит и сохраняет номер положения диска затвора, $N_{\text{пд}}^1$.

31. Расчёт. Автоматически рассчитывается угол положения диска затвора в массиве по известному номеру положения затвора Углы открытия указаны в Таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Положения диска затвора

Номер положения открытия диска, № _{пд}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Угол открытия диска затвора (град)	40	50	60	65	70	75	80	83	86	90

32. Автоматический вывод. СУМТО автоматически выводит и сохраняет угол положения диска затвора для дальнейшей передачи в цифро-аналоговый преобразователь, для изменения величины тока, управляющего открытием затвора.

33. Расчёт останавливается до следующего пуска счётчика.

3.3 Расчет экономического ущерба при перегреве трансформатора

В случае повышения температуры верхних слоёв масла в баке трансформатора до 100 °С или температуры обмотки трансформатора до 115°С защиты трансформатора будут действовать на его аварийное отключение.

После аварийного отключения трансформатора из-за перегрева обмоток согласно НТД следует провести контрольные замеры и испытания для подтверждения готовности трансформатора к работе в сети, на выполнение которых необходимо будет затратить как минимум двое суток. Если замеры и испытания покажут, что требуется ремонт повреждённой фазы аварийно отключившегося трансформатора, то для замены повреждённой фазы на резервную, потребуется затратить ещё шесть дней.

Аварийное отключение трансформатора повлечёт за собой фиксацию аварийного отключения генерирующего оборудования, то есть двух генераторов укрупнённого блока с номинальной мощностью 640 МВт каждый, что приведёт к снижению мощности из-за несогласованного с системным оператором отключения оборудования и фиксацией – Δ6.

Снижение мощности из-за аварийного отключения генерирующего оборудования фиксируется в течение 4-х часов. С момента аварийного отключения трансформатора в течение 1 часа должна быть подана аварийная заявка, далее, если оборудование не включено в сеть, и при наличии поданной аварийной заявки, фиксируется Δ4.

Убыток и упущенная выгода на рынке мощности при простое за час одного генератора СШГЭС с номинальной мощностью 640 МВт при цене за мощность КОМ с учётом коэффициента сезонности в июне 2018 года 234 рубля за МВт в час при фиксации Δ6 составит 284 305 рублей. Убытки и упущенная выгода для двух генераторов за один час составят соответственно 568 610 рублей, а за четыре часа - 2 274 440 рублей.

Вывод генерирующего оборудования по неотложным заявкам, фиксируется через 4 часа после аварийного отключения при наличии поданной аварийной заявки, до 2-х суток (48 ч), пока не будут учтены в макете РСВ X-2 (рынок сутки вперёд).

Убытки и упущенная выгода для генератора СШГЭС за один час при фиксации Δ4 составят 197 474 рублей, для двух генераторов – 394 948 рублей, и за 48 часов – 18 957 504 рубля.

Если предположить, что после аварийного отключения испытания покажут, что трансформатор может быть включён в сеть, то убыток и упущенная выгода на рынке мощности при простое двух генераторов СШГЭС составит 21 231 994 рубля без учёта затрат на проведение испытаний.

При отрицательных результатах проведенных испытаний, если они покажут, что потребуется ремонт фазы, и замена её на резервную, то последующие дни на рынке мощности будет фиксироваться вывод генерирующего оборудования по неплановым заявкам, которых нет в месячном плане которые не поданы в макеты ВСВГО и в макеты РСВ X-2 (на послезавтра) - Δ2.1.

Убытки и упущенная выгода для генератора СШГЭС за один час при фиксации Δ2.1 составят 160 257 рублей, для двух генераторов – 320 514 рублей, и за каждые сутки – 7 692336 рублей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обеспечение безаварийной работы силовых трансформаторов как одного из основных видов электротехнического оборудования определяет надежность энергосистемы в целом, поэтому совершенствование его работы, в том числе автоматизация всех этапов его работы всегда будет перспективной и важной областью исследования.

Автоматизация производства – одно из основных направлений в современной промышленности, которое также актуально и для всех стадий работы гидроэлектростанции.

Данный проект по автоматизации системы охлаждения трансформаторов будет являться частью системы мониторинга, функционирующей уже сегодня, поэтому данный проект потребует минимальных финансовых вложений.

Использование данного метода автоматизации возможно не только для Саяно–Шушенской ГЭС, но и для других энергообъектов с трансформаторами в типом охлаждения Ц (масляно-водяное с принудительной циркуляцией масла). При применении на других объектах необходима корректировка расчетов и алгоритмов, учитывающая особенность оборудования и климата.

Автоматизация системы охлаждения трансформаторов позволит:

- Повысить устойчивость энергосистемы;
- Увеличить срок службы трансформаторов;
- Разгрузить персонал;
- Исключить работу оборудования в режиме перегрева;
- Уменьшить количество отключений оборудования;
- Избежать недоотпуск электроэнергии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1) Studfiles. Расчет потерь энергии в трансформаторах [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.studfiles.ru/preview/5441025/page:4/>
- 2) Охлаждающие устройства масляных трансформаторов / А.М. Голунов. – М.: Издательство «Энергия», 1964. - 152 с.
- 3) Энергетика. Оборудование и документация. Тепловой расчет системы водомасляного охлаждения трансформаторов - Охлаждающие устройства масляных трансформаторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://forca.ru/knigi/arhivy/ohlazhdayuschie-ustroystva-maslyanyh-transformatorov-19.html>
- 4) ГОСТ Р 54419-2011 (МЭК 60076-122008) Трансформаторы силовые. Часть 12. [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://www.cntd.ru/assets/files - /upload/270612/54419-2011.pdf>
- 5) ГОСТ 14209-97 (МЭК 354-91) Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://forca.ru/knigi/ - gost/rukovodstvo-po-nagruzke-silovyh-maslyanyh-transformatorov -gost -14209-97.html>
- 6) V-Кип. Трансформаторные насосы. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://v-kip.ru/1te-1-te-te-maslonasos-1te-transformatornye-nasosy-1te-100-15-1te-100-20.html>
- 7) Аимтек. Маслоохладитель МО-53-4-1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://aimtek.ru/masloohladiteli-mo>
- 8) Интерарм. Затворы дисковые поворотные. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.interarm.ru/catalog/zatvory-diskovye-povorotnye/zatvory-povorotnye-diskovye-zaporno-regulirujuschie-100>
- 9) Тепловые процессы: Учебное пособие/ Под ред. Г. И. Николаев и др. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2004 – 124 с.
- 10) Мордкович А.Г., Турнот В.А. Система управления мониторинга и диагностики трансформаторного оборудования: Журнал: Элеткро. Электроэнергетика, электротехника, электротехническая промышленность, декабрь 2008;
- 11) Валутских А.О., Дулькин И.Н., Филиппов А.А. Моделирование теплового режима трансформатора в системах управления, мониторинга и диагностики. Журнал: Элеткро. Электроэнергетика, электротехника, электротехническая промышленность, июнь 2009;
- 12) Белобородов В.А. Организация мониторинга технического состояния оборудования Саяно – Шушенского гидроэнергетического комплекса. Сборник конференции ГЭС в XXI веке, 2016
- 13) Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов. М.: Энергия 1980. Т. 1.
- 14) Корунный Д.С. Создание оперативной автоматизированной системы контроля гидротехнических сооружений Майнского гидроузла филиала ПАО РусГидро Саяно – Шушенской ГЭС им. П.С. Непорожного
- 15) Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975.

- 16) Е. Ю. Комков, А. И. Тихонов «Разработка модели управления системой охлаждения силовых трансформаторов»: Журнал: Автоматизация в промышленности, август 2008.
- 17) В.П. Вдовико. Методология диагностирования высоковольтного электрооборудования – Новосибирск: Наука, 2011. – 118 с.
- 18) Автоматизированное управление технологическими процессами : Учеб. Пособие / Зотов И. С., Назаров О. В., Петельсин Б. В. Яковлев В. Б.; Под ред. Яковлева В. Б. Л.: Издательство Ленинградского университета, 1988.
- 19) Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975.
- 20) ГОСТ 11677-85. Трансформаторы (и автотрансформаторы) силовые. Общие технические требования трансформаторах. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://docs.cntd.ru/document/gost-11677-85>
- 21) ИНСТРУКЦИЯ по эксплуатации системы теплового контроля гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС.
- 23) ПУЭ «Правила устройства электроустановок. Издание 7». [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://www.ruscable.ru/info/pue/pue7.pdf>
- 24) ТЗ Система мониторинга и диагностики трансформаторного оборудования СУМТО ОРЦ 533000/500 (16 шт.) для Филиала ОАО «РусГидро» - «Саяно-Шушенская ГЭС им. П.С. Непорожного».
- 25) Техническое задание Система управления и мониторинга трансформаторным оборудованием для СШГЭС_ред 4_23.03.11

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Алгоритм расчета остаточного ресурса трансформатора

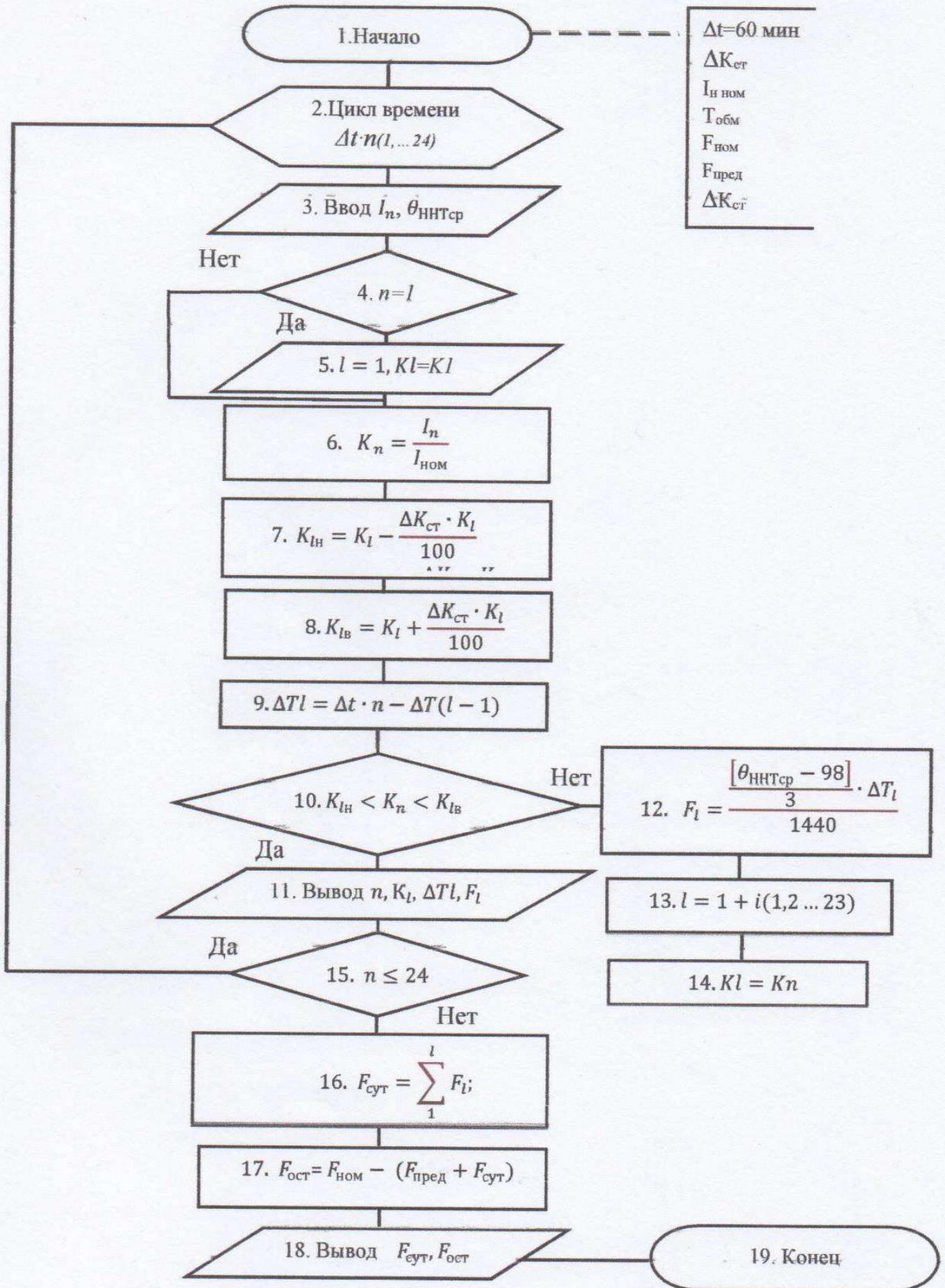


Рисунок А.1 - Алгоритм расчета остаточного ресурса трансформатора

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Структурная схема охлаждения трансформатора

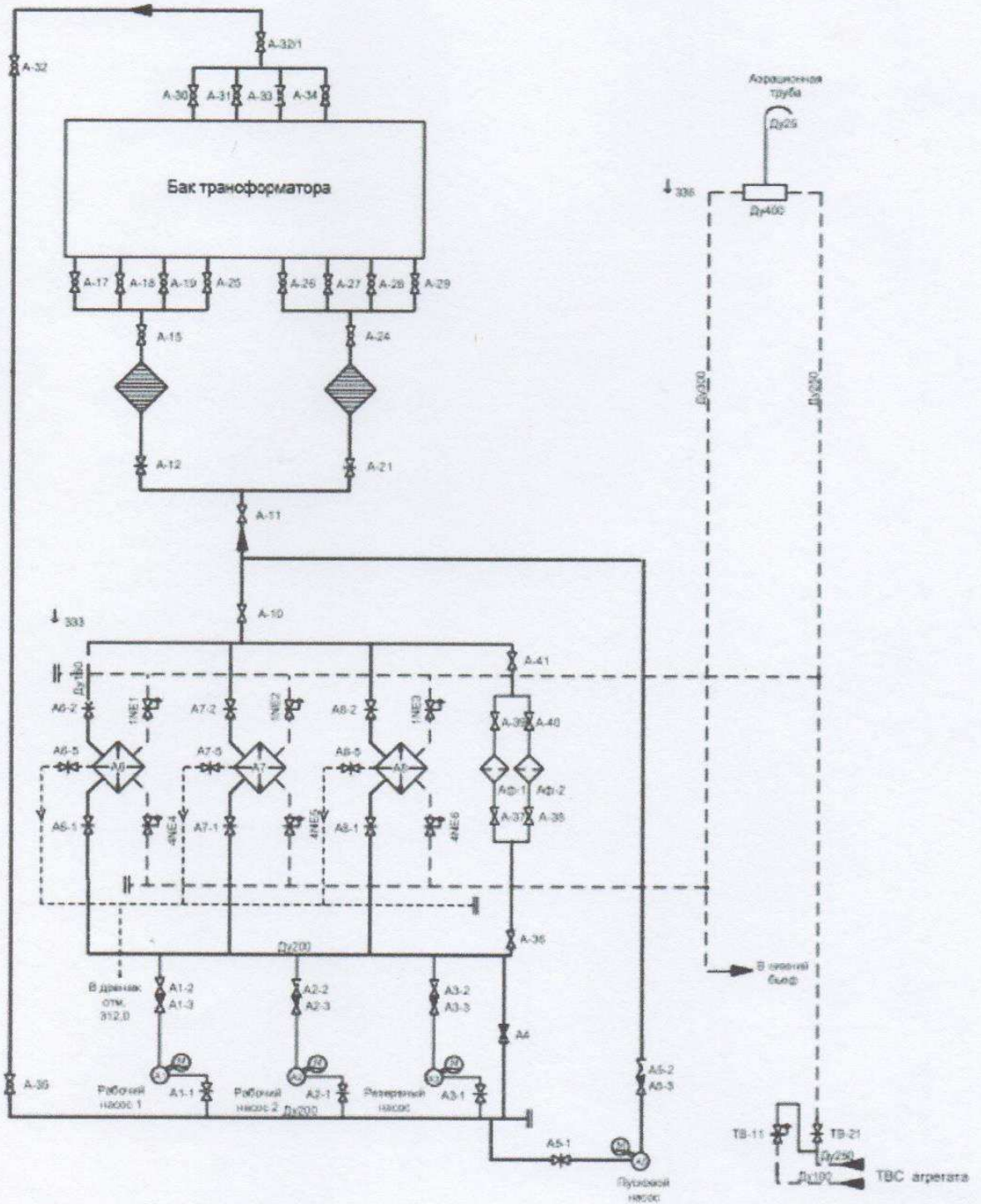


Рисунок Б.1 – Структурная схема системы охлаждения трансформатора

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Алгоритм автоматизации системы охлаждения трансформаторов ОРЦ 533000/500 У1

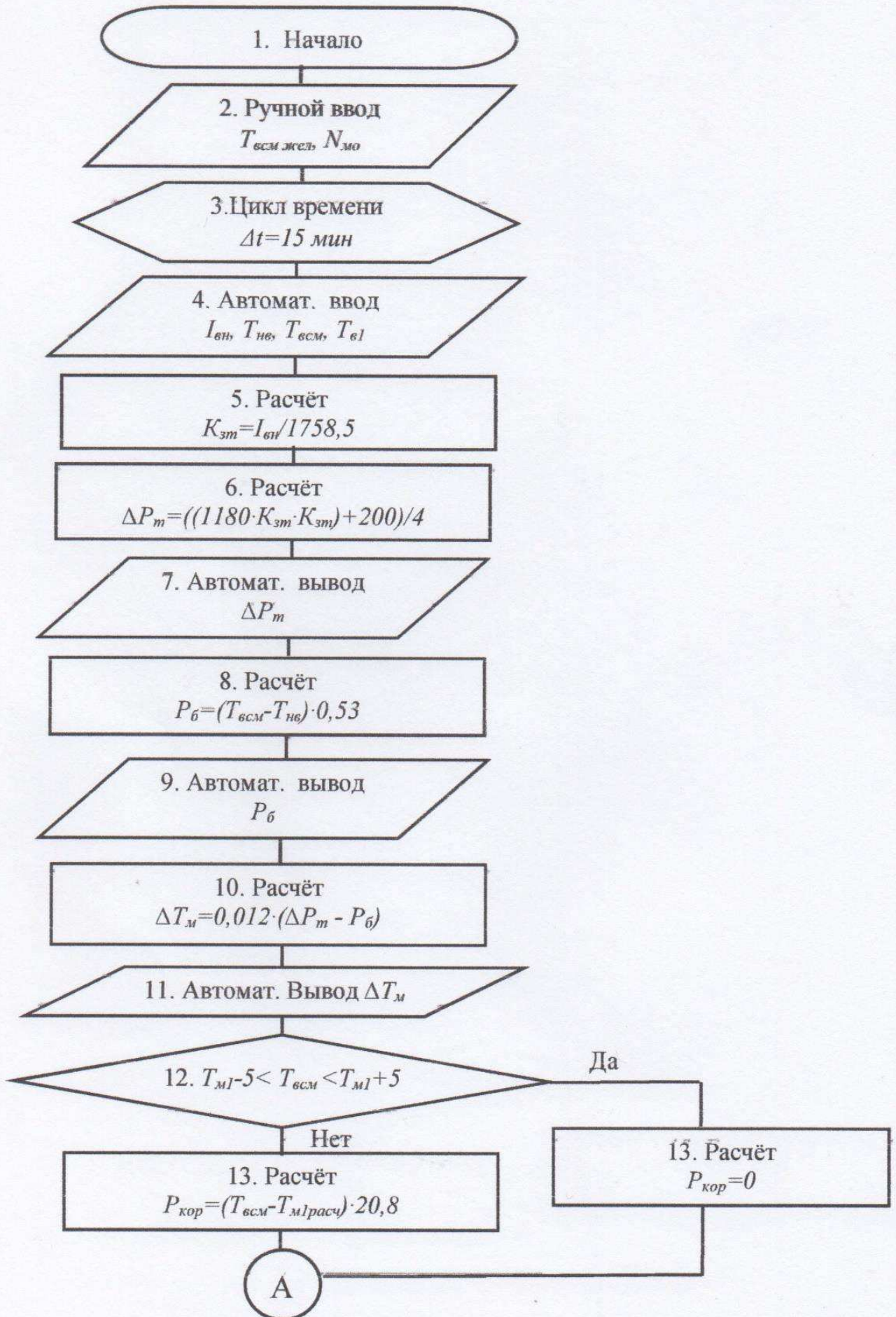


Рисунок В.1 – Алгоритм автоматизации системы охлаждения трансформаторов

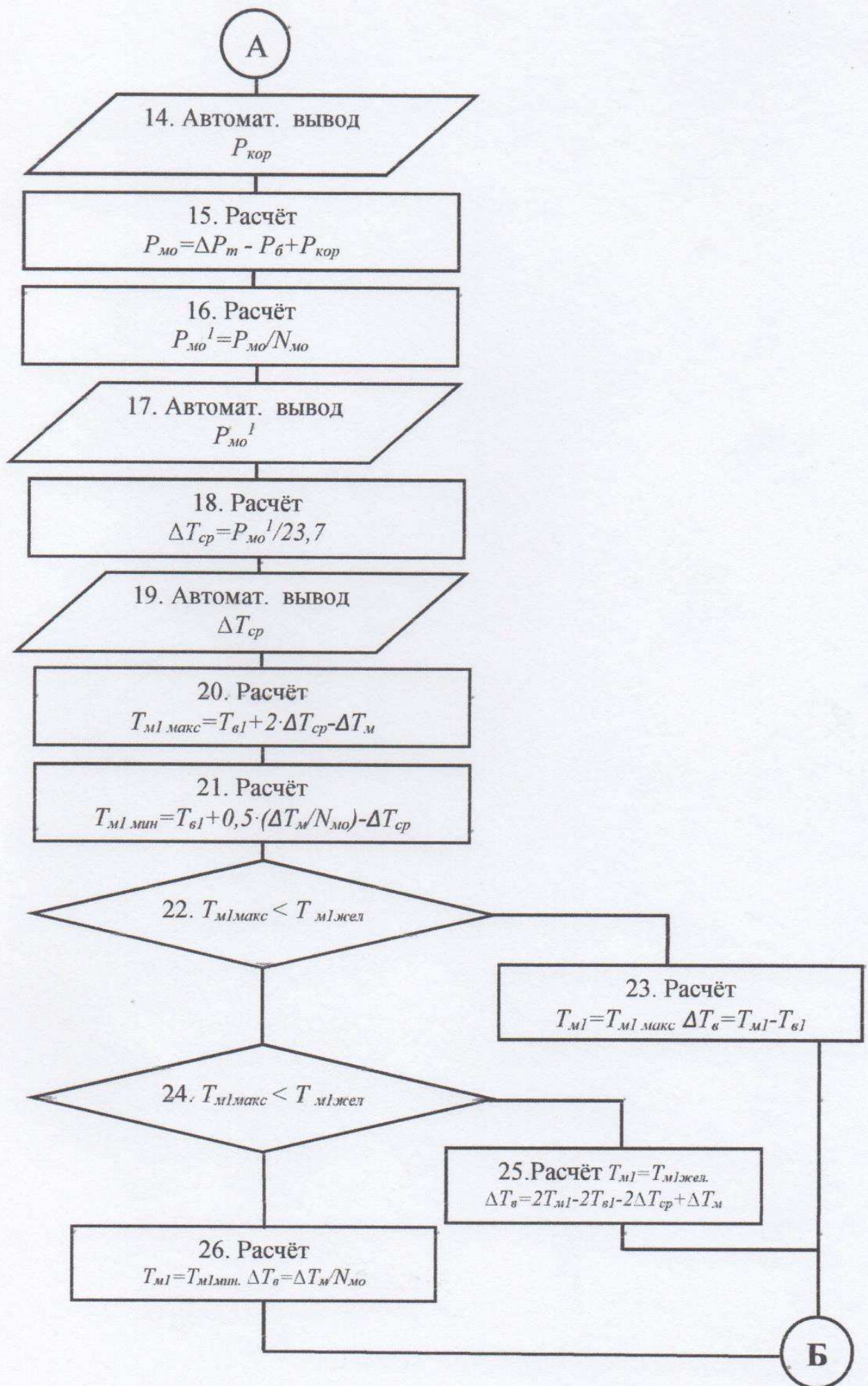


Рисунок В.2 – Алгоритм автоматизации системы охлаждения трансформаторов

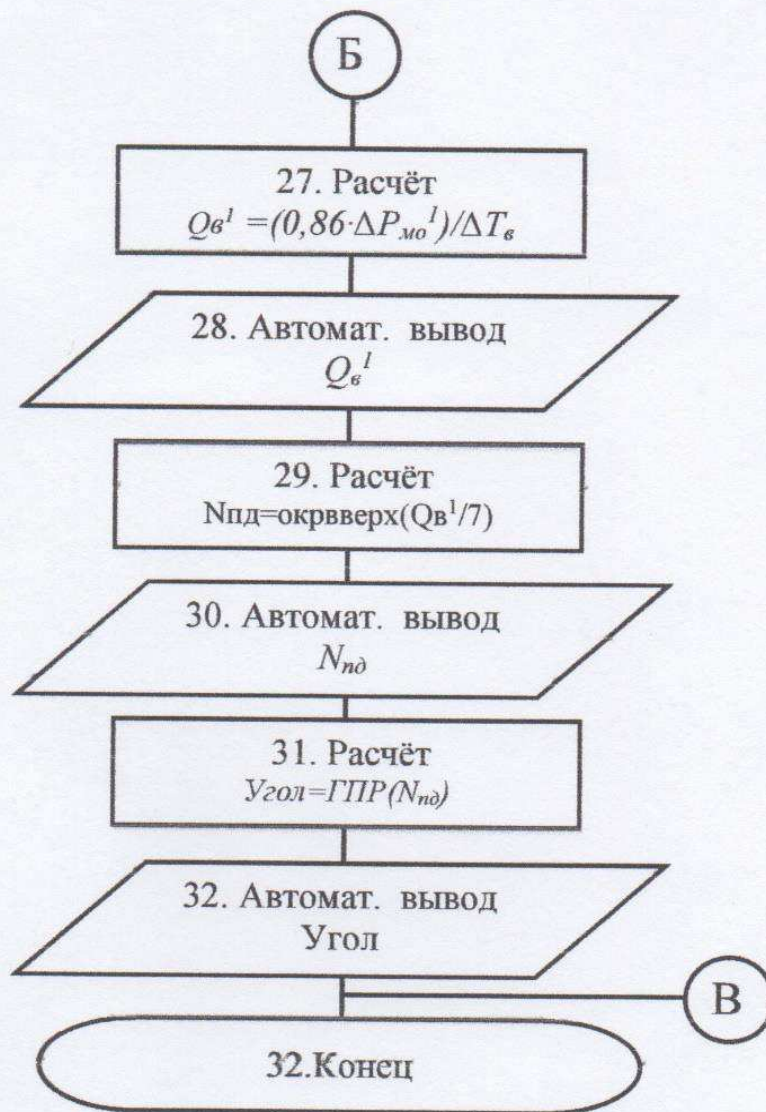


Рисунок В.3 – Алгоритм автоматизации системы охлаждения трансформаторов

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. Погоняйченко

подпись инициалы, фамилия

« 15 » 06 2018 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СИЛОВЫХ
ТРАНСФОРМАТОРОВ САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС**

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

13.04.02.06 Гидроэлектростанции

Научный
руководитель


подпись, дата

Инженер по наладке и
испытаниям
Филиала ПАО «РусГидро»
«Саяно-Шушенская ГЭС
имени П.С. Непорожного»
должность

Н.А. Иванов
инициалы, фамилия

Выпускник


подпись, дата

М.Ю. Мальцева
инициалы, фамилия

Рецензент


подпись, дата

Ведущий инженер по
наладке и испытаниям
Филиала ПАО «РусГидро»
«Саяно-Шушенская ГЭС
имени П.С. Непорожного»
должность

А.Е. Безубенко
инициалы, фамилия

Нормоконтролёр


подпись, дата

А.А. Чабанова
инициалы, фамилия

Саяногорск, Черемушки 2018