

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки)

Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и систем

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Разработка автоматизированной системы управления охлаждением силовых автотрансформаторов на ПС «Южная»

Обучающийся

А.С. Шкурдода

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., В.И. Платов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2023

Содержание

Введение.....	4
Перечень сокращений и обозначений.....	7
1 Краткая характеристика подстанции «Южная». Анализ основных технических решений по организации автоматизированной системы управления охлаждением силовых трансформаторов	10
1.1 Обоснование принятой схемы электроснабжения, выбора конструктивных и инженерно-технических решений	12
1.2 Требования к надежности электроснабжения и качеству электроэнергии	14
2 Разработка элементов автоматизированной системы управления охлаждением силовых автотрансформаторов на подстанции «Южная»	19
2.1 Сети связи	19
2.1.1 Датчики температуры верхних слоев масла - контроллер АСУ ОТ	19
2.1.2 АРМ в операторской ОПУ	20
2.1.3 Основные требования к по подключению оборудования ВОЛС..	21
2.2 Диспетчеризация	23
2.2.1 Передаваемые и получаемые сигналы.....	24
2.2.2 Алгоритм поддержания температуры.....	26
2.2.3 Архивирование данных	26
2.2.4 Визуализация данных	30
2.2.5 Управление	32
2.2.6 Аварийные защиты	32
2.2.7 Коммутация с АРМ, находящимся в здании ОПУ	36
2.3 Алгоритмы работы систем охлаждения автотрансформаторов	36
2.3.1 Исходные положения и допущения	37
2.3.2 Уставки.....	38
2.3.3 Данные, получаемые с КИП	38

2.3.4 Принцип работы алгоритма	39
2.4 Состав автоматизированной системы управления охлаждением АТ1, АТ2.....	46
2.4.1 Состав АСУ ОТ	47
2.4.2 Структура АСУ ОТ	50
2.4.3 Описание системы и алгоритмов работы АСУ ОТ	51
2.4.4 Резервирование АСУ ОТ АТ1, АТ2	53
2.4.5 Переключение на ШАОТ	54
2.5 Решения по электромагнитной совместимости устройств	55
2.5.1 Устройство заземления и систем уравнивания потенциалов объекта	58
2.5.2 Выбор сечения заземлителей и заземляющих проводников	59
2.5.3 Заземление МП аппаратуры.....	59
2.5.4 Мероприятия по электробезопасности	60
2.5.5 Установка УЗИП	60
2.5.6 Организация электроснабжения постоянным током	61
2.5.7 Организация электроснабжения переменным током	61
2.5.8 Система молниезащиты объекта	61
2.5.9 Технические решения по экранированию МП аппаратуры	62
2.5.10 Защита от электростатических разрядов	63
2.6 Интеграция разработанных решений в системы РЗА подстанции	63
2.6.1 Параллельная работа АСУ ОТ и ШАОТ	65
2.6.2 Расчет токов КЗ	66
3 Оценка энергетической эффективности от реализации предлагаемых решений на подстанции.....	73
Заключение	79
Список используемой литературы и используемых источников.....	82

Введение

Современные универсальные микропроцессорные системы управления охлаждением трансформаторов предназначены для эффективной работы с вентиляторами и маслонасосами, входящими в состав систем охлаждения мощных силовых трансформаторов с рабочим напряжением 220 - 500 кВ.

Как правило в системе реализуется полный и универсальный набор функций контроля и управления, обеспечивающий оптимальные температурные параметры силового трансформатора во всех режимах его работы, включая переходные режимы включения и отключения.

«Конструктивно система управления охлаждением состоит из четырех основных элементов:

- набора первичных датчиков контроля параметров трансформатора;
- микропроцессорного прибора (контроллера) для измерения и обработки первичных параметров для формирования сигналов управления;
- силовой панели управления с контакторами включения электродвигателей насосов и вентиляторов;
- монтажного шкафа системы, устанавливаемого рядом с трансформатором» [1].

К основным функциям управления относятся [1, 2]:

- «включение элементов системы охлаждения при вводе трансформатора в работу, при этом алгоритм работы контроллера зависит от типа системы охлаждения и начальной температуры масла;
- включение и отключение электродвигателей насосов и вентиляторов системы охлаждения для поддержания заданной температуры бака трансформатора» [2];

- «оперативное включение дополнительных элементов системы охлаждения при повышении нагрузки трансформатора, данная функция позволяет избежать перегревов обмоток трансформатора;
- опережающее включение элементов системы охлаждения в соответствии с планируемым графиком нагрузки трансформатора - функция «прекулинг», данная функция позволяет эффективно уменьшить температуру наиболее нагретой точки обмотки;
- программируемый график отключения маслонасосов и вентиляторов системы охлаждения при выводе трансформатора из работы.

Для оптимальной реализации этих функций управления все маслонасосы и вентиляторы системы охлаждения трансформатора делятся на группы, имеющие разный технологический статус:

- оборудование, имеющее «первый» статус, всегда находящееся в работе, пока включен трансформатор, это базовый уровень работы системы охлаждения;
- оборудование, имеющее «второй» и последующие статусы, которое последовательно включается в работу при повышении нагрузки и температуры;
- оборудование, находящееся в ремонте или обслуживании, и которое не может быть включено в работу в данный момент времени, имеет последний статус» [2].

Объектом внедрения автоматизированной системы управления охлаждением трансформаторов (АСУ ОТ) на основе частотно-регулируемого привода (ЧРП) являются автотрансформаторы АТ1, АТ2 подстанции «Южная».

«АСУ ОТ предназначена для частотного регулирования скорости вращения маслонасосов и вентиляторов для снижения затрат электроэнергии на охлаждение с поддержанием температуры наиболее нагретой точки трансформатора в допустимых пределах без непосредственного измерения

(при помощи вычислений исходя из уровня нагрузки трансформатора, температуры верхних слоев масла и скорости его циркуляции)» [1].

«Для размещения оборудования управления частотными преобразователями двигателей и сопутствующего оборудования предусмотрено контейнерное исполнение АСУ ОТ (с возможностью автоматического поддержания внутреннего микроклимата)» [2]. Категория размещения контейнера АСУ ОТ – УХЛ1, внутреннего оборудования – по требованиям изготовителей оборудования. В контейнере предполагается организация автоматизированного рабочего места (АРМ).

Наряду с организацией АРМ непосредственно в контейнере, предполагается организация АРМ в помещении главного щита управления подстанцией. Для минимизации объема вновь прокладываемого кабеля предполагается установка одного контейнера АСУ ОТ для автотрансформаторов АТ1, АТ2.

На основе приведенного анализа можно сформулировать примерную цель и задачи диссертационного исследования.

Целью работы является снижение расхода электроэнергии на собственные нужды ПС 500 кВ «Южная» путем внедрения системы частотного регулирования работы приводов охладителей АТ1, АТ2, позволяющей существенно снизить расход электроэнергии на охлаждение трансформатора с сохранением температуры наиболее нагретой точки обмотки в допустимых пределах.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- краткая характеристика подстанции «Южная». Анализ основных технических решений по организации автоматизированной системы управления охлаждением силовых трансформаторов;
- разработка элементов автоматизированной системы управления охлаждением силовых автотрансформаторов на подстанции «Южная»;
- оценка энергетической эффективности от реализации предлагаемых решений на подстанции.

Перечень сокращений и обозначений

- «АБ – аккумуляторная батарея;
- АВР – автоматический ввода резерва;
- АРМ – автоматизированное рабочее место;
- АСКУЭ – автоматизированная система контроля и учета электроэнергии;
- АСУ – автоматизированная система управления» [8];
- АСУ ОТ – автоматизированная система управления охлаждением трансформатора;
- АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическими процессами;
- АТ – автотрансформатор;
- АТС – автоматическая телефонная станция;
- «ВЛ – воздушная линия» [8];
- ВСМ – верхние слои масла в баке трансформатора (автотрансформатора);
- «ВЧ – высокочастотный;
- ВЩУ – вспомогательный щит управления;
- ГЩУ – главный щит управления;
- ЗУ – заземляющее устройство;
- ИБП – источник бесперебойного питания;
- ИМП – импульсное магнитное поле» [8];
- «КЗ – короткое замыкание;
- КРУ – комплектное распределительное устройство;
- КРУН – комплектное распределительное устройство наружное» [1];
- «КСУ – контейнер систем управления;
- МИП – микросекундная импульсная помеха;
- МП – микропроцессорный;
- МППЧ – магнитное поле промышленной частоты;

МЭК – международная электротехническая комиссия;
НИП – наносекундная импульсная помеха;
НТД – нормативно-техническая документация;
ОПН – ограничитель перенапряжений;
ОПУ – около-подстанционный пункт управления;
ОРУ – открытое распределительное устройство;
ОТ – оперативный ток;
ППУ – подстанционный пульт управления;
ПС – подстанция;
ПУЭ – правила устройства электроустановок;
ПЧ – преобразователь частоты;
РЗА – релейная защита и автоматика;
РЩ – релейный щит» [8];
СН – собственные нужды;
СН ПС - собственные нужды подстанции;
СО – система охлаждения трансформатора (автотрансформатора);
СУТ - система утилизации тепла;
ТМХ – трансформаторно-масляное хозяйство;
ТН – трансформатор напряжения;
ТТ – трансформатор тока;
УЗИП – устройство защиты от импульсных перенапряжений;
УС – узел связи;
ЦПУ – центральный пульт управления;
ЧРП – частотно регулируемый привод;
ШАОТ – шкаф автоматического управления охлаждением трансформатора;
ШКД – шкаф коммутации двигателями;
ШРОП – шкаф распределения основного питания;
ШУП – шина уравнивания потенциалов;
ЩАП – щит аварийного питания;

«ЩОТ – щит оперативного тока;
ЩПТ – щит постоянного тока;
ЩСН – щит собственных нужд;
ЩУ – щит управления» [8];
ЭМО – электромагнитная обстановка;
ЭМП – электромагнитное поле;
ЭМС – электромагнитная совместимость;
ЭС – электростанция;
ЭСР – электростатический разряд;
ЭТЛ – электротехническая лаборатория;
ЯЗ – ящик зажимов.

1 Краткая характеристика подстанции «Южная». Анализ основных технических решений по организации автоматизированной системы управления охлаждением силовых трансформаторов

Подстанция 500 кВ Южная, введена в эксплуатацию в 1954 году. Ее расположение показано на рисунке 1, адрес: г. Екатеринбург, пер. Энергетиков, 7.

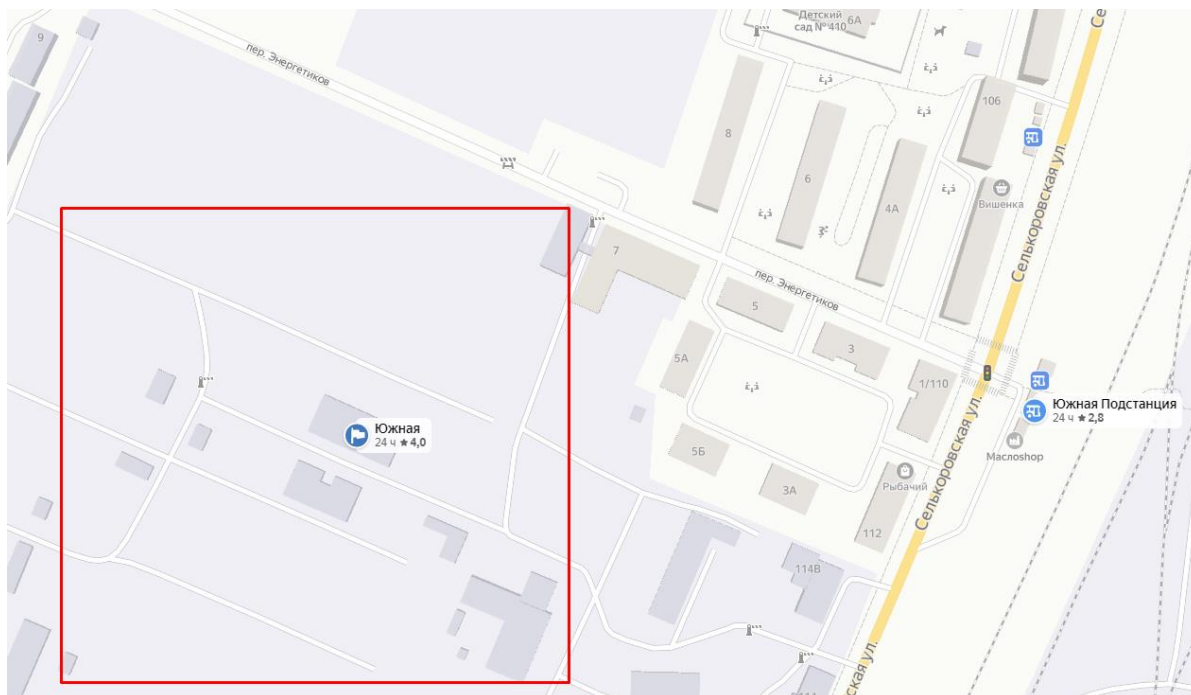


Рисунок 1 – План расположения подстанции на карте города

На территории подстанции расположены основные технологические здания и сооружения. Оборудование включает в себя 8 однофазных и трехфазных автотрансформаторов общей мощностью 1502 МВА. Подстанция имеет ОРУ 500кВ, 220кВ, 110 кВ, ЗРУ – 10кВ. От подстанции отходят 4 линии 500 кВ, 6 линий 220 кВ, 10 линий 110 кВ.

На подстанции установлены две группы по три однофазных автотрансформатора АТ3 и АТ4 суммарной мощностью 2×501 МВА на

напряжение 500/220 кВ и два автотрансформатора АТ1 и АТ2 по 250 МВА на напряжение 220/110/10 кВ.

«АТ1, АТ2 - трехфазные автотрансформаторы АТДЦТН-250000/220/110 оснащены 6 охладителями, в составе каждого маслонасос мощностью 2,9 кВт и два вентилятора мощностью 2,2 кВт каждый, один из охладителей резервный» [7].

Климат района умеренно-континентальный. По результатам многолетних наблюдений характеризуется основными показателями, приведенными в таблице 1.

Таблица 1 – Климатические показатели в районе размещения подстанции

Холодный период	
Температура наружного воздуха (Параметр А: Температура воздуха, обеспеченность 0,92)	-38 °С
Температура наружного воздуха (Параметр Б: температура воздуха наиболее холодной пятидневки, обеспеченность 0,92)	-32 °С
Абсолютная минимальная температура воздуха	-47°С
Теплый период	
Температура наружного воздуха (Параметр А: Температура воздуха, обеспеченность 0,95.)	+23 °С
Температура наружного воздуха (Параметр Б: средняя максимальная температура наиболее теплого месяца.)	+23,3 °С
Абсолютная максимальная температура воздуха	+38 °С
Количество осадков в год	392 мм
Сейсмичность района составляет менее	6 баллов

Результатом проведённого предварительного обследования, которое было выполнено на подстанции Южная были сформулированы первые выводы о возможности снижения расходов электроэнергии на собственные нужды охлаждения силовых трансформаторов, которых можно добиться путём установки автоматизированной системы управления охлаждением трансформатора и обеспечением соблюдения температуры наиболее нагретой точки у силового трансформатора в соответствии с действующими нормами.

Первоначально для дальнейшего исследования в работе намечен вариант осуществления параллельной работы всех охладителей, кроме резервного, с осуществлением регулирования скорости вращения охлаждающих трансформатор вентиляторов и подающих в систему масло насосов.

В настоящей работе рассматривается система электроснабжения АСУ ОТ АТ1, система охлаждения АТ2 выполняется аналогичным образом.

1.1 Обоснование принятой схемы электроснабжения, выбора конструктивных и инженерно-технических решений

«АТ1 - Автотрансформатор АТДЦТН-250000/220/110/10 силовой трехфазный масляный трехобмоточный с регулированием напряжения под нагрузкой на стороне среднего напряжения, с системой охлаждения вида ДЦ - принудительной циркуляцией воздуха и масла, со схемой и группой соединения обмоток Унавто/Д-0-11 предназначен для связи электрических сетей напряжением 220 и 110 кВ.

В отличие от существующего алгоритма работы системы охлаждения, предусматривается включение всех вентиляторов и маслонасосов (кроме резервного охладителя) в параллельную работу с групповым регулированием частоты их вращения в зависимости от температуры наиболее нагретой точки и текущей загрузки трансформатора. Данное решение позволит значительно снизить потребляемую мощность и увеличить срок службы маслонасосов и вентиляторов, так как момент на валу электродвигателя маслонасоса и вентилятора пропорционален квадрату, а потребляемая мощность - кубу скорости вращения» [3].

Система охлаждения трансформатора снабжается частотными преобразователями следующим образом: один ПЧ для управления приводом маслонасоса и один ПЧ для управления парой вентиляторов охладителя [4].

Для установки шкафов управления охладителями трансформаторов предусматривается контейнер АСУ ОТ АТ1. Для автотрансформатора АТ1 предусматривается 8 шкафов управления, из которых 7 - с частотными преобразователями и один резервный, без ПЧ.

Питание контейнера АСУ ОТ АТ1 осуществляется от силовой сборки, устанавливаемой в щите собственных нужд. Предусматривается установка новых автоматических выключателей, выключателей-разъединителей в силовой сборке и прокладка кабелей питания контейнера.

В качестве резервной системы управления охлаждением АТ1 используются существующие шкафы автоматического охлаждения трансформатора (ШАОТ).

Коммутация электродвигателей вентиляторов и маслонасосов системы охлаждения между АСУ ОТ АТ1 и существующей системой управления охлаждением будет осуществляться в шкафах коммутации двигателей (ШКД) ШКД1 АТ1 и ШКД2 АТ1. ШКД расположены в непосредственной близости от ШАОТ.

От контейнера до ШКД необходимо проложить бетонные кабельные лотки шириной 0,5м. Кабельные лотки устанавливаются на щебеночную подготовку с глубиной заглибления не менее 0,2 м. Дополнительно новые лотки прокладываются непосредственно под контейнером в ряду установленных шкафов ЧРП. Необходимо демонтировать старый кабель питания двигателей насосов и вентиляторов блоков охлаждения трансформаторов, идущих от существующих ШАОТ к двигателям и проложить новый кабель питания.

Электроприемниками в данной работе являются маслонасосы и вентиляторы охладителей автотрансформаторов.

Для охлаждения автотрансформатора АТ1 используются 6 охладительных блоков, состоящих из маслонасоса мощностью $P_p=3$ кВт и двух вентиляторов мощностью $P_p=2.2$ кВт каждый.

1.2 Требования к надежности электроснабжения и качеству электроэнергии

Все электроприемники в данной работе относятся к категории электроснабжения I. Категория электроснабжения I обеспечивается блоками АВР в контейнере АСУ ОТ, на каждый из которых подключаются 2 питающих кабеля (основное и резервное питание). АВР работает с приоритетом на основное питание.

В качестве резервной системы управления охлаждением АТ1 используются шкафы ШАОТ, которые остаются в работе.

Технические характеристики вновь устанавливаемых автоматов:

Для питания вентиляторов системы охлаждения трансформатора используются автоматические выключатели с номинальным током 25 А и характеристикой срабатывания типа С (один автоматический выключатель на группу из 2-х вентиляторов, подключенных к одному частотному преобразователю). Для питания маслососов используются АВ с номинальным током 16 А и характеристикой срабатывания типа С [5].

На ЩСН устанавливаются 2 АВ TS250N (основное и резервное питание).

Контейнер системы управления АСУ ОТ АТ1 содержит шкафы управления с блоками АВР, в которых кроме аппаратов автоматического ввода резерва находятся счетчики потребляемой электроэнергии системой охлаждения трансформатора, шкафы управления без блока АВР.

Блок АВР выдает сигналы наличия питания и сигнал для системы технологической защиты о потере охлаждения. Информация со счетчика потребляемой энергии передается в логический контроллер с помощью импульсного выхода.

Шкафы управления приводами оборудованы частотными преобразователями для двигателей маслососов и вентиляторов системы охлаждения, аппаратами защиты и отключения, модулями аналоговых и

дискретных выходов. Один шкаф управления приводами АСУ ОТ рассчитан на управление одним блоком системы охлаждения, содержащим маслонасос и 2 вентилятора. При этом два вентилятора одного блока охлаждения АСУ ОТ управляются одним частотным преобразователем.

Шкаф управления приводами резервного охладителя не оснащен частотными преобразователями ввиду предполагаемой кратковременности его работы.

Контейнер АСУ ОТ оборудован освещением, системой кондиционирования, отопления и пожаротушения. Электропитание собственных нужд контейнера осуществляется посредством ящика собственных нужд (ЯСН).

Переключение управления двигателей СО от ШАОТ на АСУ ОТ осуществляется реверсивными контакторами, расположенными в шкафах коммутации двигателей. Принципиальная схема показана на рисунке 2. Шкафы коммутации двигателей располагаются в непосредственной близости от ШАОТ. Электропитание соответствующих систем осуществляется через специальный ящик собственных нужд [6].

В здании ОПУ в помещении щита управления подстанцией организовано дополнительное автоматизированное рабочее место, которое будет оборудовано блоком визуализации с монитором и клавиатурой, контроллером для получения и обработки входящих сигналов (загрузка трансформатора от амперметров, данные о перегреве масла с существующих дискретных датчиков и т.д.).

АРМ устанавливается рядом со столом оператора в помещении ГЩУ.

Оборудование АРМ запитывается от ЩПТ в здании ОПУ 2 вводами.

Заземление контейнера АСУ ОТ осуществляется по месту путем присоединения их стальной полосой 40x5 к существующему заземляющему контуру. Разработка решений по молниезащите не требуется, все оборудование входит в существующую зону молниезащиты трансформаторов.

Контейнер
АСУ ОТ АТ1

АВР (АТ1)
 $P_{уст} = 64,8 \text{ кВт}$
 $P_p = 64,8 \text{ кВт}$
 $I_p = 124,8 \text{ А}$
 $\kappa_c = 1,0$
 $\cos = 0,79$

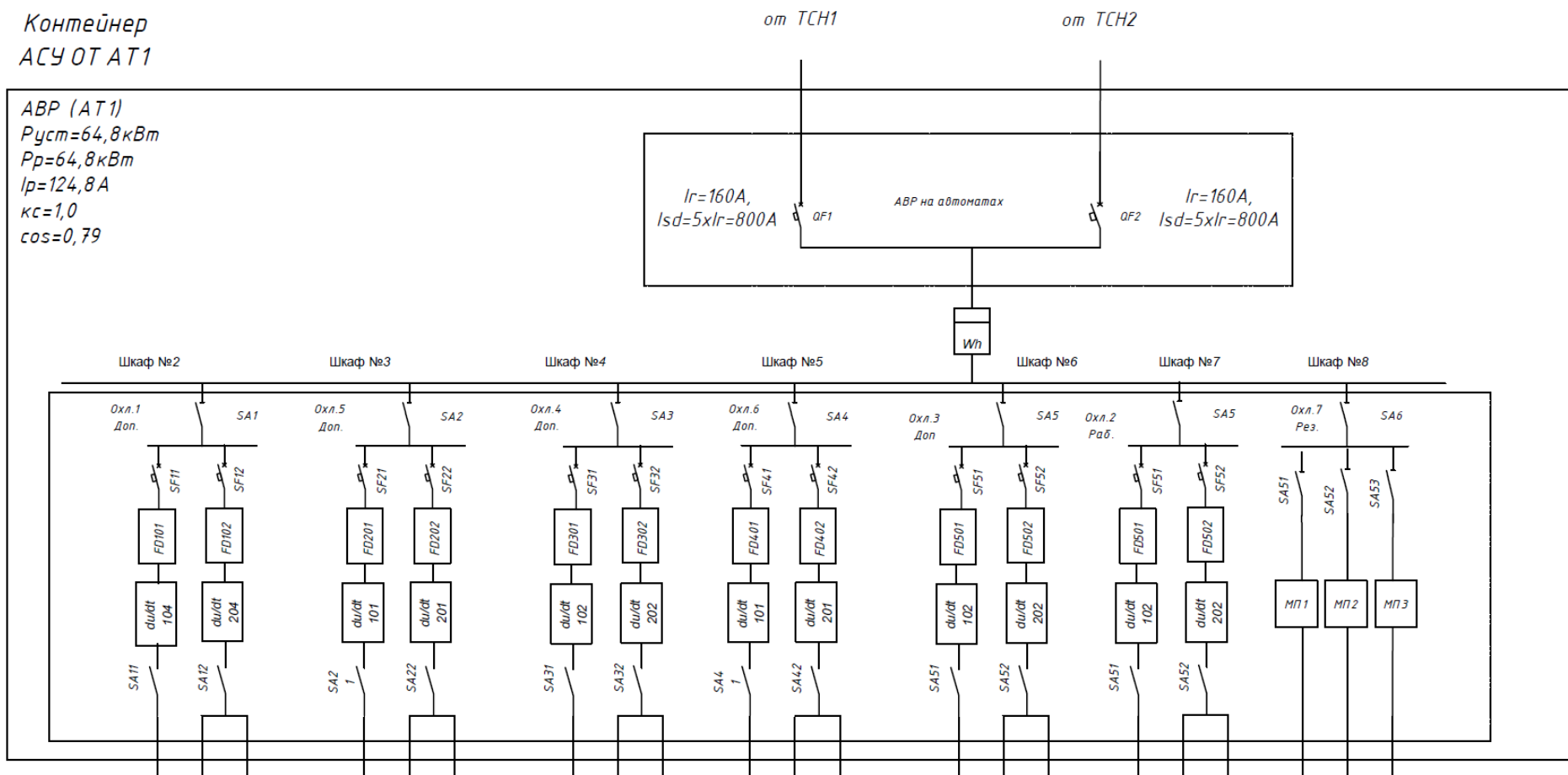


Рисунок 2 - Принципиальная схема электроснабжения АСУ ОТ АТ1

Для питания контейнера АСУ ОТ АТ1 используются силовые кабели с 4 алюминиевыми жилами, в изоляции и оболочке из поливинилхлоридного пластика пониженной пожарной опасности с низким выделением дыма АВВГнг(А)-LS [7].

Для питания маслonaсосов и вентиляторов используется силовой кабель с 4 медными жилами, в изоляции из негорючего ПВХ пластика с пониженным выделением дыма, в экране из медных лент, в оболочке из ПВХ пластика с пониженной пожарной опасностью и пониженным выделением дыма ВВГЭнг(А)-LS.

Для перемычек между ШАОТ и ШКД используется силовой кабель с 4 медными жилами, в изоляции из негорючего ПВХ пластика с пониженным выделением дыма, в оболочке из ПВХ пластика с пониженной пожарной опасностью и пониженным выделением дыма ВВГнг(А)-LS.

Для питания АРМ в здании ОПУ используется силовой кабель с 3 медными жилами, в изоляции из негорючего ПВХ пластика с пониженным выделением дыма, в оболочке из ПВХ пластика с пониженной пожарной опасностью и пониженным выделением дыма ВВГнг (А)-LS.

Выводы по разделу 1.

Оборудование ПС «Южная» включает в себя 8 однофазных и трехфазных автотрансформаторов общей мощностью 1502 МВА. «АТ1, АТ2 - трехфазные автотрансформаторы АТДЦТН-250000/220/110 оснащены 6 охладителями, в составе каждого маслonaсос мощностью 2,9 кВт и два вентилятора мощностью 2,2 кВт каждый, один из охладителей резервный» [3].

Результатом проведённого предварительного обследования, которое было выполнено на подстанции Южная были сформулированы первые выводы о возможности снижения расходов электроэнергии на собственные нужды охлаждения силовых трансформаторов, которых можно добиться путём установки автоматизированной системы управления охлаждением трансформатора и обеспечением соблюдения температуры наиболее нагретой точки у силового трансформатора в соответствии с действующими нормами.

Первоначально для дальнейшего исследования в работе намечен вариант осуществления параллельной работы всех охладителей, кроме резервного, с осуществлением регулирования скорости вращения охлаждающих трансформатор вентиляторов и подающих в систему масло насосов в зависимости от загрузки трансформаторов и температуры ННТ.

«Данное решение позволит значительно снизить потребляемую мощность и увеличить срок службы маслонасосов и вентиляторов, так как момент на валу электродвигателя маслонасоса и вентилятора пропорционален квадрату, а потребляемая мощность - кубу скорости вращения» [3].

Система охлаждения трансформатора снабжается частотными преобразователями следующим образом: один ПЧ для управления приводом маслонасоса и один ПЧ для управления парой вентиляторов охладителя.

Для установки шкафов управления охладителями трансформаторов предусматривается контейнер АСУ ОТ АТ1. Для автотрансформатора АТ1 предусматривается 8 шкафов управления, из которых 7 - с частотными преобразователями и один резервный, без ПЧ.

Питание контейнера АСУ ОТ АТ1 осуществляется от силовой сборки, устанавливаемой в щите собственных нужд. Предусматривается установка новых автоматических выключателей, выключателей-разъединителей в силовой сборке и прокладка кабелей питания контейнера.

В качестве резервной системы управления охлаждением АТ1 используются существующие шкафы автоматического охлаждения трансформатора (ШАОТ).

В здании ОПУ в помещении щита управления подстанцией организовано дополнительное автоматизированное рабочее место, которое будет оборудовано блоком визуализации с монитором и клавиатурой, контроллером для получения и обработки входящих сигналов (загрузка трансформатора от амперметров, данные о перегреве масла с существующих дискретных датчиков и т.д.).

2 Разработка элементов автоматизированной системы управления охлаждением силовых автотрансформаторов на подстанции «Южная»

2.1 Сети связи

В рамках данной работы предлагается прокладка линий связи:

- между датчиками температуры верхних слоев масла трансформаторов АТ1(ф. А/ ф. В/ ф. С) и преобразователем АСУ ОТ АТ1 в шкафу ПД (ф. А/ ф. В/ ф. С);
- между преобразователями АСУ ОТ АТ1 в шкафу ПД (ф. А/ ф. В/ ф. С) и контроллером в контейнере АСУ ОТ АТ1;
- между ШКД АТ1 (ф. А/ ф. В/ ф. С) и контроллером в контейнере АСУ ОТ АТ1;
- релейной защиты от потери охлаждения трансформатора (между соответствующими ШАОТ АТ1(ф. А/ ф. В/ ф. С) и ШУ в контейнере АСУ ОТ АТ1;
- между контроллерами в контейнере АСУ ОТ АТ1и АРМ АСУ ОТ в здании ОПУ.

2.1.1 Датчики температуры верхних слоев масла - контроллер АСУ ОТ

Для передачи сигнала накладных датчиков термосопротивления в условиях электромагнитных помех будет использоваться цифровые преобразователи, размещаемые в выходных шкафах, которые могут быть размещены на выходных шкафах коммутации двигателей или других опорных конструкциях, в зависимости от места расположения ШКД. Следовательно, от датчиков температуры до преобразователей будут идти сигнальные кабели МКЭШнг(А)-LS 4×1 мм. От преобразователя до контроллера будет идти кабель типа «витая пара» EthernetCat.5 24 AWG [8].

На рисунке 3 показана структурная схема подключения датчиков температуры.

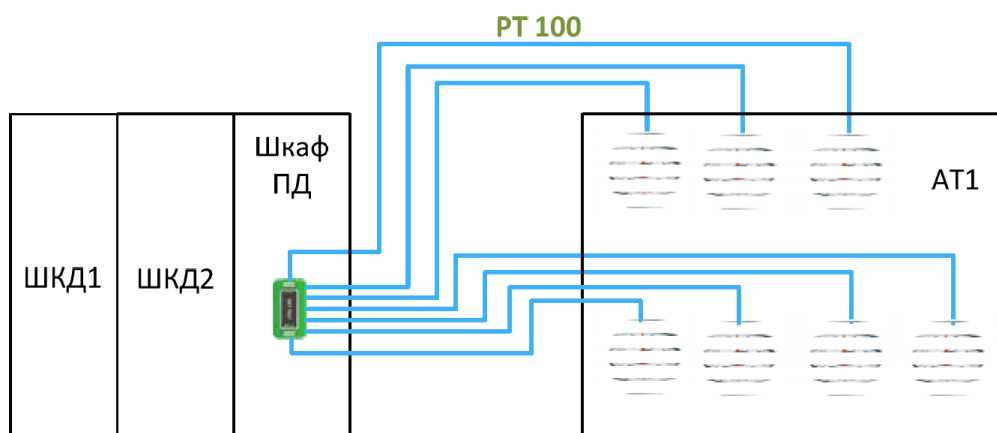


Рисунок 3 - Структурная схема подключения датчиков температуры

2.1.2 АРМ в операторской ОПУ

Данные от контроллеров в соответствующих контейнерах АСУ ОТ до здания ОПУ в помещение ГЩУ будет осуществляться по одномодовому ВОК 9/125 4×ОВ с исполнением нг(А)-НФ. Преобразование сигналов будет производиться медиаконверторами [9].

Шкафы коммутации двигателей управляются сухим контактом. Соединение будет произведено кабелем МКЭШнг(А)-LS 10×1,5 мм.

Интеграция в цепи неисправности СО («ЗПО» и «неисправность охлаждения») организована от шкафа управления АСУ ОТ АТ1 / к ШАОТ АТ1 кабелем КВВГЭнг(А)-LS3×2,5.

Идентификация состояния АТ («Работа»/ «авария»/ «неисправность») осуществляется с помощью сигнальной лампы подключаемых к панели щита ССПИ кабелем КВВГЭнг(А)-LS4×1,5.

Интеграция в существующую АУПС ПС 500 кВ «Южная» производится с помощью подключения к прибору существующей АУПС в помещении АППН здания ОПУ ГЩУ кабелем КПСЭнг(А)-FRLS 2×2×1,5 в гофрированной ПНД трубе.

2.1.3 Основные требования к по подключению оборудования ВОЛС

Для соединения оптических кроссов с оборудованием ВОЛС предусматриваются оптические патч-корды.

Оптические волокна сращиваются методом сварки в электрической дуге при помощи специального устройства, согласно разработанной методике.

Для контроля качества сварного соединения необходимо использовать рефлектометр обратного рассеивания. С его помощью измеряют не только затухание и его изменения вдоль ОВ, но и затухание на отдельных неоднородностях ОВ, позволяя определить их месторасположение, а также измерение затухания сростков (вносимого сварным соединением) [10].

Процесс сращивания ОВ включает подготовку концов ОВ, их сварку и защиту места сварки. При подготовке концов удаляется защитное покрытие и их обработка путем скола, который должен быть строго перпендикулярен оси ОВ. После сварки оптические волокна в гильзах КДЗС выкладывают между фиксаторами кассеты. «Запас длины каждого оптического волокна внутри кассеты должен составлять не менее 0,8-1,2 м. После выкладки волокна производят контроль качества сварного стыка» [7].

Строительно-монтажные работы должны выполняться с соблюдением РД 153-34.0-48.518-98 «Правила проектирования, строительства и эксплуатации волоконно-оптических линий связи на воздушных линиях электропередачи напряжением 110 кВ и выше», а также СТО 56947007-33.180.10.172-2014 «Технологическая связь. Эталон проектной документации на строительство ВОЛС-ВЛ с ОКСН и ОКГТ».

По помещениям зданий до проектируемых оптических кроссов на 4 ОВ, устанавливаемых в проектируемых шкафах, кабели ВОК прокладываются по кабельным конструкциям в оранжевой гофро-трубе, не распространяющей горение. Через каждые 15 метров ВОК, на поворотах, входах и выходах через стены кабель обозначить бирками, бирки должны быть стойкими к воздействию окружающей среды.

Прокладка оптических патч-кордов в пределах одного помещения, но между различными шкафами, а также под фальшполами, должна быть предусмотрена с механической защитой.

Места присоединения труб с ВОК к кабельному лотку заделывать огнезащитной мастикой и защищать термоусадочными трубками.

Вводы ВОК в стальные гильзы ввода в здание и проходок между стен герметизировать при помощи герметизирующих огнеупорных мастик.

Технологический запас располагать под фальш-полом, фальш-потолком, в кабельном полуэтаже. В случае отсутствия технической возможности расположения технологического запаса в указанных местах по согласованию с ПМЭС допускается располагать техзапас на стенах помещения на специальных барабанах или уложить в шкаф.

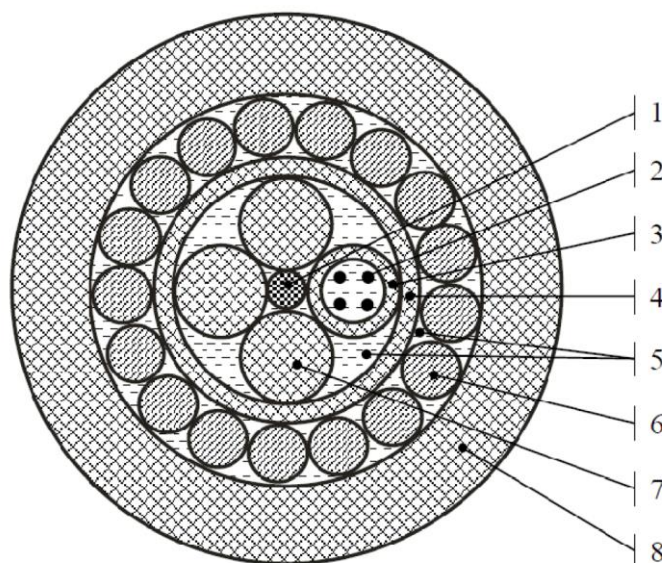
Крепление ВОК к кабельным лоткам на горизонтальных участках трассы выполнить с использованием металлических хомутов типа СКС [15].

2.1.4 Требования к конструкции ВОК и схема конструкции ВОК

Требования к конструкции ВОК и основные характеристики:

- тип оптического волокна – SM 9/125 (SMF-28 Ultra);
- количество волокон – 4 волокна;
- стойкость кабеля к максимально допустимой растягивающей нагрузке – 7,0 кН;
- стойкость кабеля к максимально допустимому раздавливающему усилию – 0,4 кН/см;
- стойкость кабеля к одиночному удару – 30 Дж;
- диапазон температур эксплуатации кабеля от минус 60 до 70⁰С°;
- минимально допустимая температура кабеля при монтаже – минус 10⁰С°;
- температура хранения кабеля от минус 60 до 50⁰С°;
- номинальный наружный диаметр кабеля – 11,8 мм;
- расчётная масса кабеля ~160 кг/км;
- минимально допустимый радиус изгиба кабеля – 236 мм.

На рисунке 4 приведена схема конструкции ВОК.



1 - центральный элемент – стеклопластиковый пруток; 2 - четыре одномодовых оптических волокна в модуле, соответствующих рекомендациям МСЭ-Т G.652.D/G.657.A1, с пониженным коэффициентом затухания и улучшенными изгибными характеристиками, гидрофобный наполнитель; 3 - трубка из полибутилентерефталатной композиции; 4 - внутренняя (промежуточная) полиэтиленовая оболочка; 5 - гидрофобный наполнитель; 6 - бронеповив из стеклопластиковых прутков; 7 - Заполняющий элемент – кордель; 8 - наружная полимерная оболочка в исполнении нг(А)-НФ - не распространяющем горение при групповой прокладке с пониженным дымо- и газовыделением и не выделяющая коррозионно-активных газообразных продуктов при горении и тлении

Рисунок 4 – Схема конструкции ВОК

2.2 Диспетчеризация

«Для работы автоматической системы управления охлаждением трансформатора (АСУ ОТ) и регулирования частоты вращения двигателей вентиляторов и маслонасосов необходимо получать данные о текущей нагрузке трансформатора и температуре верхних слоев масла в виде цифровых или токовых сигналов» [33].

Для получения данных о температуре верхних слоев масла будет произведена дополнительная установка накладных датчиков температуры с термоизоляцией от внешних воздействий. Сигнал pt100 от датчиков температуры будет поступать в аналоговый цифровой преобразователь для дальнейшей передачи в контроллер.

Данные о загрузке автотрансформаторов АТ1 и АТ2 будут получены путем подключения к новым измерительным модулям по протоколу ModBus TCP.

2.2.1 Передаваемые и получаемые сигналы

Все информационные сигналы из ОПУ в контейнеры АСУ ОТ и обратно передаются посредством оптоволоконного кабеля, что позволяет осуществлять передачу на большие расстояния и без электромагнитных помех.

В таблице 2 представлены получаемые и передаваемые АСУ ОТ аналоговые сигналы.

Таблица 2 - Таблица сигналов для одного АТ

Назначение	Тип, количество
Загрузка трансформатора АТ1	ModBus TCP
Загрузка трансформатора АТ2	ModBus TCP
Температура ВСМ	Modbus TCP (28 шт.)
Температура окружающей среды	Pt100 (2 шт.)
Температура воздуха в контейнере АСУ ОТ	Pt100 (2 шт.)
Частота работы двигателя	4..20 мА
Управляющие токи на приводы вентиляторов и маслонасосов	Силовой кабель ВВГнг 4x4 мм
Данные для информационной панели	оптоволоконный кабель
Технологическая защита (ЗПО)	Дискретный сигнал (220В const), КВВГЭнг 5x1,5 мм
Технологическая защита (неисправность системы охлаждения)	Дискретный сигнал (220В const), КВВГЭнг 5x1,5 мм
Данные счетчика электроэнергии	Импульсный выход

В таблице 3 представлены получаемые и передаваемые АСУ ОТ дискретные сигналы [34].

Таблица 3 - Дискретные сигналы АСУ ОТ

Входные дискретные сигналы		
Сигнал	Источник	Назначение
Работа ПЧ	ПЧ	Система в работе
Авария ПЧ	ПЧ	Система в аварии
Питание КСУ	Автомат КСУ	Включен рубильник
Наличие питания АВР	АВР	Наличие питания на вводе АВР
Ввод АВР включен	АВР	Активный в данный момент ввод
Автомат АВР включен	АВР	Состояние вводного автомата
Контакты ШАОТ включены	ШКД	Система охлаждения работает от ШАОТ
Контакты КСУ включены	ШКД	Системы охлаждения работает от КСУ
Сброс ошибки	Кнопка SB3	Сигнал сброса ошибки
Выходные дискретные сигналы		
Сигнал	Устройство	Назначение
Пуск вент./масл	ЧРП вент./масл.	Работа вент./масл.
Запрет работы вент./масл	ЧРП вент./масл.	Останов вент./масл.
Переключение на ШАОТ	ШКД	Переключение контакторов на работу от ШАОТ (при пропадании данного сигнала)
Работа	Индикация (лампа)	Работа КСУ
Авария	Индикация (лампа)	Авария КСУ
Технологическая защита	Технологическая защита	Технологическая защита
АВР и контроллер	АВР и контроллер	АВР и контроллер

Исходными данными для выбора значения частоты вращения для всех маслонасосов (общее задание) и всех вентиляторов (общее задание) являются данные с датчиков и данные по загрузке трансформатора.

Входные сигналы:

- уставка частоты привода (аналоговый);
- пуск привода (дискретный);
- запрет работы привода (дискретный);
- сброс ошибки приводов (дискретный).

Выходные сигналы:

- фактическая частота вращения маслонасоса/вентилятора (аналоговый);
- готовность привода (дискретный) (привод в рабочем состоянии);
- работа привода (дискретный) (привод в работе, работает штатно);
- авария привода (дискретный) (поломка привода, перегрев обмоток двигателей и т.д.).

2.2.2 Алгоритм поддержания температуры

«АСУ ОТ предназначена для поддержания температуры наиболее нагретой точки трансформатора в допустимых пределах без непосредственного измерения (при помощи вычислений исходя из уровня нагрузки трансформатора, температуры окружающей среды, температуры трубопроводов контура циркуляции масла скорости его циркуляции (опционально)) за счет частотного регулирования скорости вращения маслонасосов и вентиляторов» [35].

Сигналы, получаемые системой управления извне (заводятся в контейнер):

- контроль температуры масляного контура трансформатора (цифровой сигнал Modbus TCP), количество 28 – от накладных датчиков температуры;
- «контроль за уровнем нагрузки трансформатора осуществляется при помощи цифровых измерительных модулей по ModBus TCP, количество сигналов/амперметров – 6 шт., по 1-му на каждую обмотку определенного уровня напряжения (ВН/СН), амперметры установлены в помещении главного щита управления подстанцией;
- контроль за температурой окружающей среды осуществляется при помощи указателя температуры воздуха pt100» [35].

2.2.3 Архивирование данных

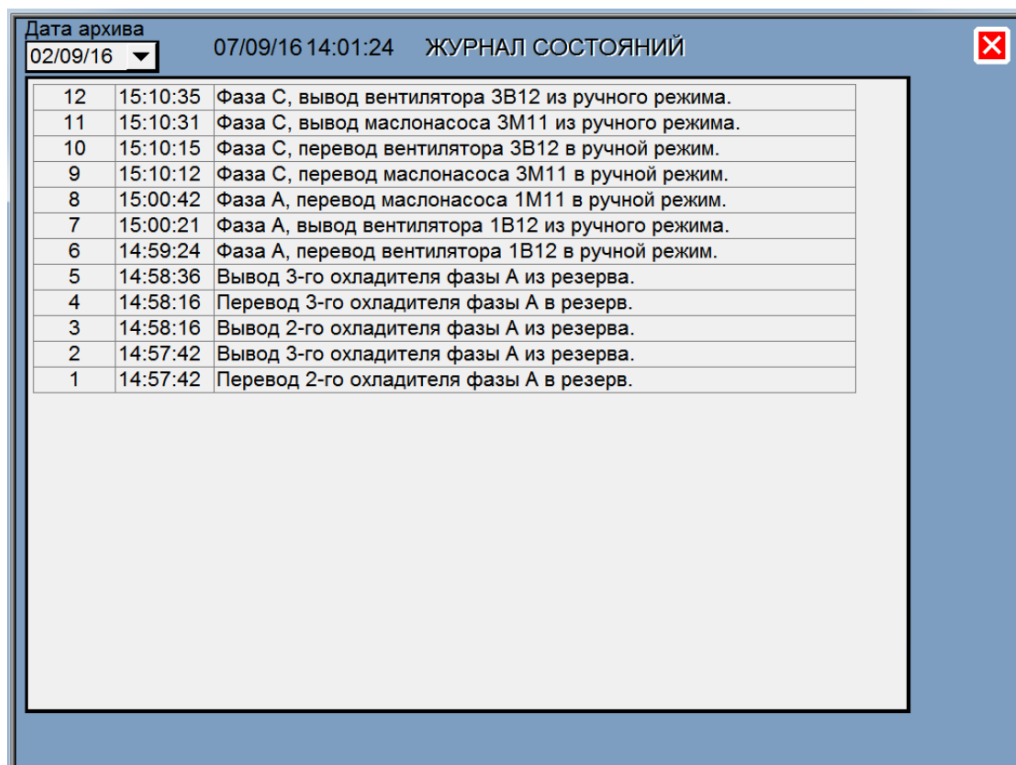
«Данные об уровне нагрузки трансформатора и температуры окружающей среды, температуры верхних слоев масла и скорости его

циркуляции, а также частота вращения вентиляторов и маслонасосов архивируются в ПЛК с интервалом 1 раз в 30 секунд, с возможностью экспорта архивных данных в файл формата MS EXCEL» [35]. Глубина архива 1 месяц.

Архивируемые данные:

- журнал аварий (все аварийные сообщения новой системы с указанием времени их возникновения, запись по возникновению аварии);
- журнал изменений состояния (действия с системой, запись по совершению действия с указанием времени):
 - нажатие кнопки «Пуск»;
 - нажатие кнопки «Стоп»;
 - перевод охладителя №n в резерв;
 - перевод охладителя №n в ручное управление;
 - запуск охладителя №n находящегося в резерве в работу;
 - срабатывание противопожарной защиты.

Внешний вид журнала состояний представлен на рисунке 5.



Дата архива		
02/09/16	07/09/16 14:01:24	ЖУРНАЛ СОСТОЯНИЙ
12	15:10:35	Фаза С, вывод вентилятора 3В12 из ручного режима.
11	15:10:31	Фаза С, вывод маслонасоса 3М11 из ручного режима.
10	15:10:15	Фаза С, перевод вентилятора 3В12 в ручной режим.
9	15:10:12	Фаза С, перевод маслонасоса 3М11 в ручной режим.
8	15:00:42	Фаза А, перевод маслонасоса 1М11 в ручной режим.
7	15:00:21	Фаза А, вывод вентилятора 1В12 из ручного режима.
6	14:59:24	Фаза А, перевод вентилятора 1В12 в ручной режим.
5	14:58:36	Вывод 3-го охладителя фазы А из резерва.
4	14:58:16	Перевод 3-го охладителя фазы А в резерв.
3	14:58:16	Вывод 2-го охладителя фазы А из резерва.
2	14:57:42	Вывод 3-го охладителя фазы А из резерва.
1	14:57:42	Перевод 2-го охладителя фазы А в резерв.

Рисунок 5 - Ведение журнала состояний

- журнал «Выборки данных» (Запись раз 1 мин. с указанием времени), из расчета на один АТ:
 - температура масляного контура трансформатора (данные с датчиков);
 - температура окружающей среды (данные с датчика, 1 шт.);
 - уровень нагрузки трансформатора (данные с измерителей нагрузки, 2 значения);
 - температура наиболее нагретой точки (расчетная);
 - все расчетные температуры масла, которые участвуют в ПИД регулировании частоты вращения приводов;
 - уставка температуры наиболее нагретой точки;
 - «заданная частота вращения вентиляторов охладителей (для каждого трансформатора расчетное значение)» [35];
 - заданная частота вращения маслонасосов охладителей (для каждого трансформатора расчетное значение);
 - потребляемая системой мощность (для каждого трансформатора расчетное значение, т.е. после каждого АВР, данные со счётчиков электроэнергии);
 - возвращаемая частота вращения двигателей от ПЧ в контроллер.

Общая глубина архива данных – 12 месяцев.

Все журналы выводятся на панель визуализации с возможностью выбора из списка интересующей даты, т.е. в каждом из журналов выбирается из списка интересующая дата и показываются записи на эту дату.

Пример построения графиков изменения параметров с течением времени представлен на рисунке 6 и рисунке 7.

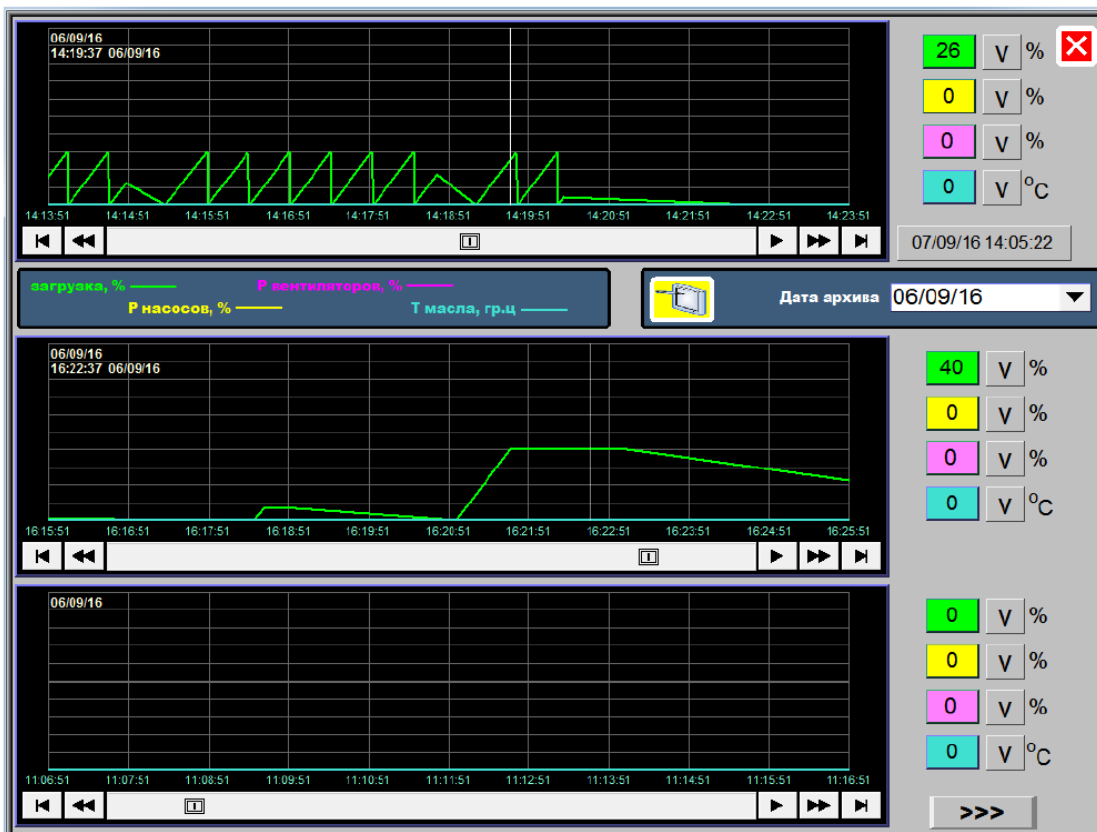


Рисунок 6 - Пример построения графиков

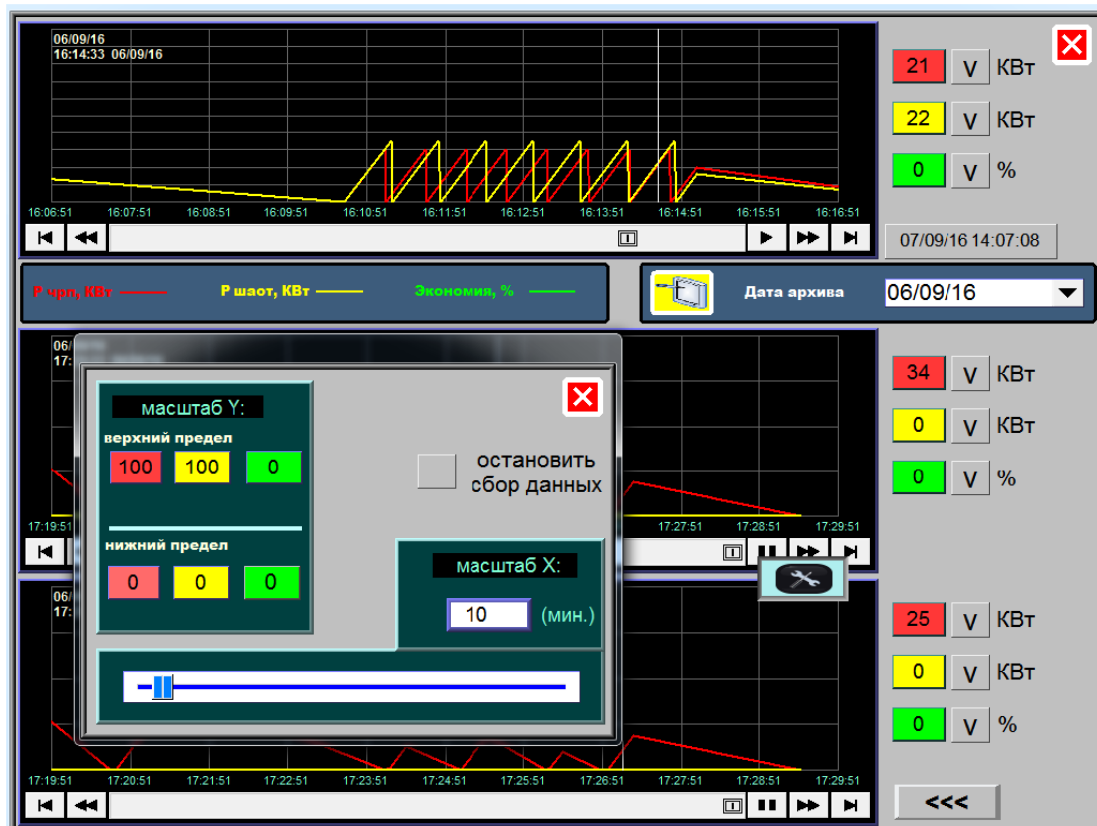


Рисунок 7 - Изменение масштаба построения графиков

«Для учета потребляемой мощности вентиляторами и маслонасосами на каждую фазу контейнера АСУ ОТ будет установлен специальный счетчик электроэнергии» [35].

2.2.4 Визуализация данных

«Визуализация данных и управление будет проходить посредством промышленной жидкокристаллической панели, расположенной на двери шкафа управления в контейнере» [36].

«На панель будет выводиться следующая информация:

- предельная температура масла;
- текущая температура масла;
- температура воздуха;
- частота вращения вентиляторов и масляных насосов;
- сигнализация о превышении допустимых температур (максимально допустимой и минимально допустимой температуры);
- сигнализация об аварийных состояниях;
- сигнализация о состоянии АВР;
- сигнализация о состоянии рубильников, подающих питание на АСУ ОТ» [36].

Полный перечень видовых экранов АСУ ОТ:

По экранам:

- главный экран с общей мнемосхемой и основными элементами индикации показан на рисунке 8;
- экран меню;
- экраны подробной информации по каждому трансформатору группы;
- экран вывода охладителя в резерв;
- экран журнала аварий;
- экран журнала действий с системой;
- экран выборок данных;
- экран графиков;

- экран настроек системы;
- экран уставок датчиков;
- всплывающее окно ручного управления каждым приводом;
- всплывающее окно уровней доступа.



Рисунок 8 - Пример информационного экрана для фаз АТ

Также на АРМ в здании ОПУ предусмотрена звуковая сигнализация, срабатывающая в следующих случаях:

- превышение заданной уставки максимальной температуры масла;
- поломка маслонасоса/вентилятора/ преобразователя частоты;
- выход температуры воздуха в контейнере за минимальную или максимальную границу;
- переход системы охлаждения трансформатором на работу от ШАОТ;
- срабатывание системы пожаротушения;
- исчезновение питания основной и/или резервной цепи;
- потеря информации о температуре трубопроводов контура циркуляции масла;

- потеря информации о температуре окружающей среды;
- потеря информации о загрузке трансформатора.

Системой предусмотрено получение информации о состоянии системы пожаротушения (посредством двух дискретных сигналов «готовность» и «работа»). Информация о температуре воздуха в контейнере АСУ ОТ будет передаваться аналоговым сигналом pt100 от датчика температуры, расположенного внутри контейнера [37].

2.2.5 Управление

«Функционал панели визуализации, расположенной в контейнере обеспечивает следующие функции:

- перевод любого вентилятора или маслонасоса (включая те, что входят в охладитель, выбранный резервным) в ручной режим с возможностью задания для него индивидуальной частоты вращения;
- уточнение параметров модели используемой в алгоритме поддержания температуры.

Касание изображения любого из вентиляторов или маслонасосов на мнемосхеме вызывает всплывающий экран «ручного управления», на котором данный вентилятор или маслонасос переводится в режим ручного управления, задается скорость вращения, и производится его включение / выключение» [8].

Сама панель управления обладает настройками точного времени, управлением цветопередачи и др., что представлено на рисунке 9 и рисунке 10.

2.2.6 Аварийные защиты

«В рамках работы АСУ ОТ могут возникнуть следующие аварийные ситуации:

- аварии компонентов АСУ ОТ;
- аварии внешних систем, обеспечивающих работу АСУ ОТ;
- отказ компонентов системы охлаждения трансформатора» [8].

Перечень аварий компонентов АСУ ОТ и поведение системы при их возникновении приведены в таблице 4.

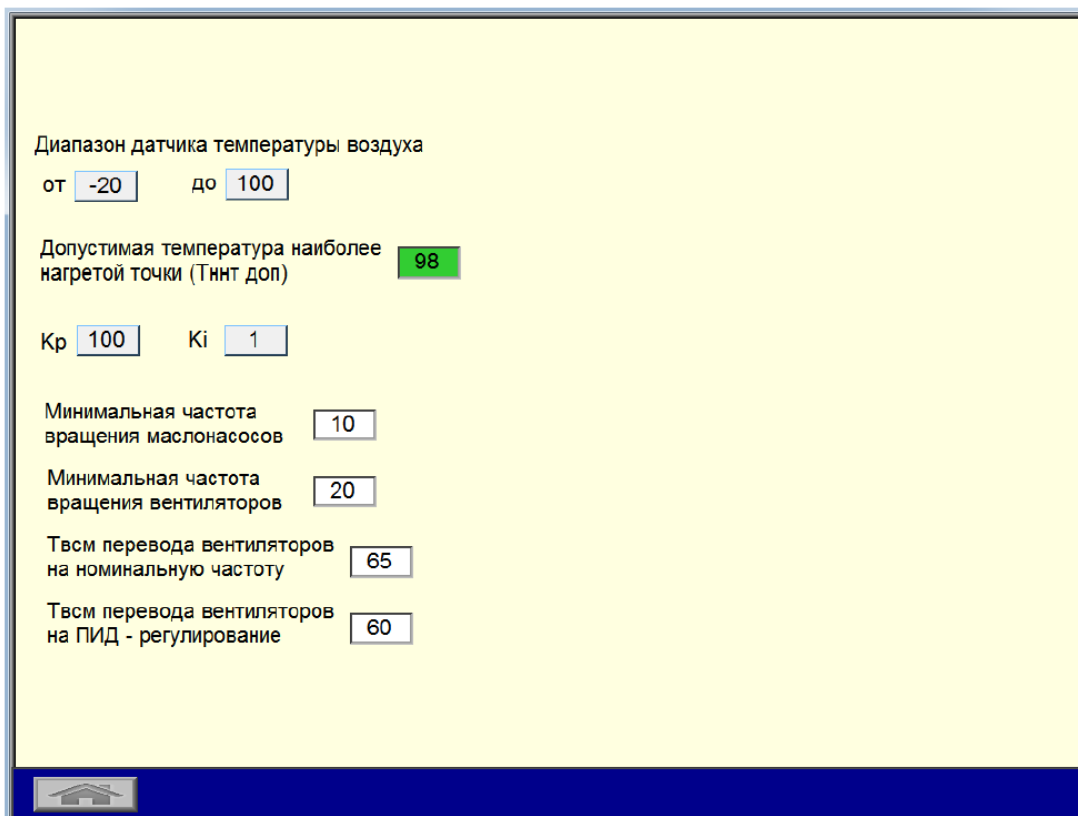


Рисунок 9 - Точная настройка параметров управления

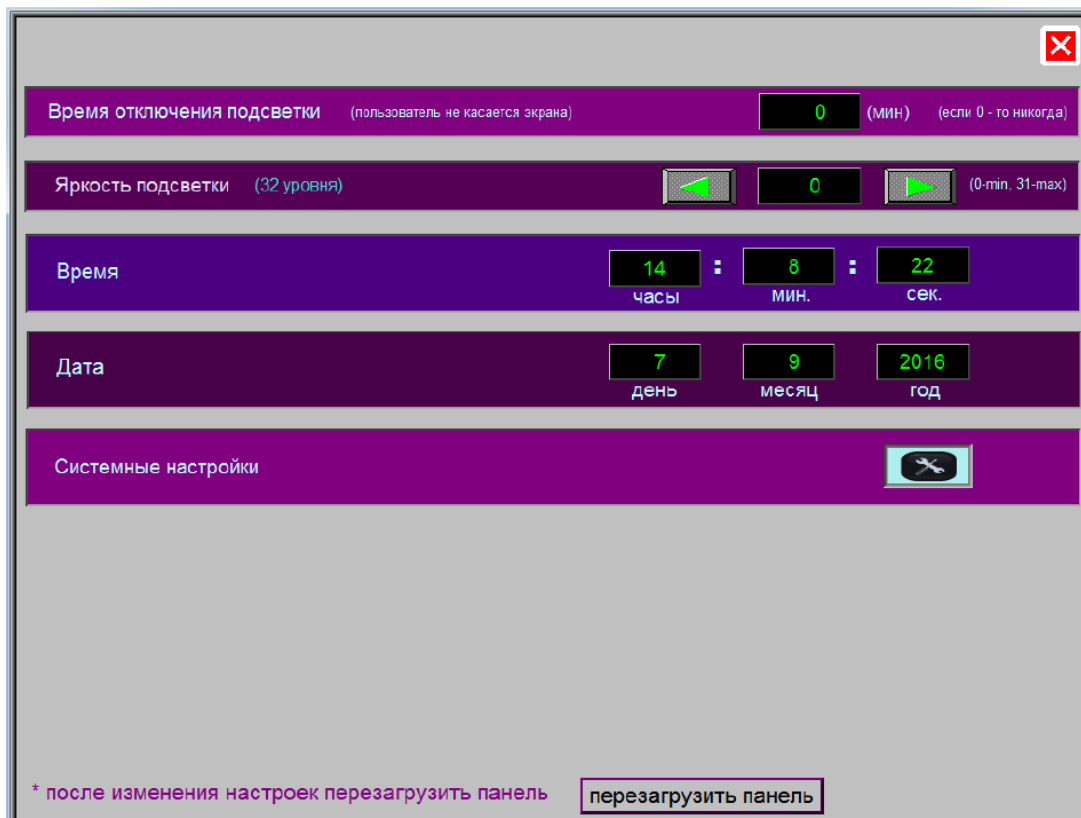


Рисунок 10 - Настройка параметров точного времени и прочие настройки

Таблица 4 - Перечень аварий компонентов АСУ ОТ

Авария	Защита
Выход из строя одного блока охладителей.	Сигнализация аварии в АРМ АСУ ОТ и на пульте дежурного подстанции. Отключение питания электродвигателя. Включение резервного охладителя на частоту 50 Гц.
Выход из строя ПЛК управления АСУ ОТ.	Сигнализация аварии в АРМ АСУ ОТ и на пульте дежурного подстанции. Перевод системы охлаждения в максимальный режим охлаждения. (Все рабочие маслонасосы и вентиляторы работают с частотой 50 Гц)

Перечень аварий внешних систем, обеспечивающих работу АСУ ОТ, и поведение системы при их возникновении приведены в таблице 5.

Таблица 5 - Перечень аварий внешних систем

Авария	Защита
Отсутствие информации о загрузке трансформатора	Сигнализация аварии в АРМ АСУ ОТ и на пульте дежурного подстанции. Переход питания электродвигателей вентиляторов и маслонасосов всех охладителей на номинальную частоту.
Отсутствие информации о температуре наружного воздуха	Сигнализация аварии в АРМ АСУ ОТ и на пульте дежурного подстанции. Переход питания электродвигателей вентиляторов и маслонасосов всех охладителей на номинальную частоту.
Отсутствие информации о температуре масла в баке трансформатора	Сигнализация аварии в АРМ АСУ ОТ и на пульте дежурного подстанции. Переход питания электродвигателей вентиляторов и маслонасосов всех охладителей на номинальную частоту.
Исчезновение питания на основной цепи	Сигнализация аварии в АРМ АСУ ОТ и на пульте дежурного подстанции. Автоматическое переключение питания на резервную линию.
Исчезновение питания на основной и резервной цепи АСУ ОТ	Сигнализация аварии в АРМ АСУ ОТ и на пульте дежурного подстанции (питание контроллера от ИБП). Автоматический переход управления системой охлаждения на существующий ШАОТ.

Перечень отказов компонент системы охлаждения трансформатора и поведение системы при их возникновении приведены в таблице 6.

Таблица 6 - Перечень аварий компонентов системы охлаждения трансформатора

Авария	Защита
Отказ (короткое замыкание) двигателя вентилятора.	Сигнализация аварии в АРМ АСУ ОТ и на пульте дежурного подстанции. Отключение питания двигателя вентилятора. (Поддержание температурного режима осуществляется автоматически за счет работающих охладителей). Включение резервного охладителя на частоту 50 Гц.
Отказ (короткое замыкание) двигателя маслонасоса.	Сигнализация аварии в АРМ АСУ ОТ и на пульте дежурного подстанции. Отключение питания двигателя маслонасоса. (Поддержание температурного режима осуществляется автоматически за счет работающих охладителей). Включение резервного охладителя на частоту 50 Гц.

Помимо защит в таблицах 5 и 6, каждый ПЧ оснащен микропроцессорной системой управления, реализующей следующие виды защит:

«Технологические защиты:

- от гидравлического удара при пуске и остановке насосного агрегата, а также при включении (отключении) дополнительного насосного агрегата;
- защита от обрыва каналов связи между контроллером и ПЧ;
- отключение двигателя при перегреве обмоток статора.

Электрические защиты:

- тепловая защита электродвигателя от перегрузки по току;
- тепловая защита преобразователя частоты;
- защита от короткого замыкания на клеммах электродвигателя;

- защита от короткого замыкания фазы двигателя на «землю»;
- защита от отключения фазы» [38].

При потере основного и резервного питания на АВР и превышении уставки ВСМ новая система автоматически переключат все выходные реверсивные контакторы ШКД в положение для работы от системы ШАОТ. Так же пропадание одного или обоих вводов отображается на панели визуализации АРМ в ОПУ в виде аварийного сообщения (пропадание связи с контроллерами контейнеров АСУ ОТ). В случае полного пропадания питания на новой системе, включая контроллер, так же произойдет переключения всех выходных реверсивных контакторов во всех ШКД (катушки контакторов в ШКД относящихся к системе ШАОТ запитываются от ШАОТ) [39].

2.2.7 Коммутация с АРМ, находящимся в здании ОПУ

АРМ в здании ОПУ представляет собой сенсорную панель, которая будет в свою очередь связана с контроллером в контейнерах АСУ ОТ АТ1 и АСУ ОТ АТ2. АРМ в здании ОПУ будет повторять функционал АРМ, находящегося в контейнере.

Данные о загрузке трансформаторов будут заведены непосредственно в контроллер АРМ.

Передача данных между АРМ, находящимся в контейнере и АРМ в ОПУ подстанции осуществлена посредством оптоволоконной кабеля и специального медиаконвертера.

Так же для вывода информации в контейнере предусмотрены клеммные блоки с типом сигнала «сухой контакт».

- «Готовность» системы АСУ ОТ;
- «Авария» системы АСУ ОТ.

2.3 Алгоритмы работы систем охлаждения автотрансформаторов

«Задача алгоритмов регулирования - расчет скорости вращения маслонасосов и вентиляторов для снижения затрат электроэнергии на охлаждение с поддержанием температуры наиболее нагретой точки

трансформатора в допустимых пределах без непосредственного измерения (при помощи вычислений исходя из уровня нагрузки трансформатора, температуры трубопровода)» [20]. Такой алгоритм работы полностью соответствует СТО ФСК «Инструкция по эксплуатации трансформаторов»:

«5.4.2 На трансформаторах с принудительной циркуляцией воздуха и масла (охлаждение вида ДЦ, НДЦ) и на трансформаторах с принудительной циркуляцией воды и масла (охлаждение вида Ц, НЦ) устройства охлаждения должны автоматически включаться (отключаться) одновременно с включением (отключением) трансформатора, если не оговорено иначе в заводском руководстве по эксплуатации. Принудительная циркуляция масла должна быть непрерывной независимо от нагрузки. Порядок включения (отключения) системы охлаждения должен быть определен в заводском руководстве по эксплуатации и может предусматривать, например (особенно в новых трансформаторах), включение циркуляции масла при достижении нагрузки 60 % номинальной.

При номинальной нагрузке разность температур масла на входе и выходе из охладителя Ц (НЦ) должна быть не менее 10 °С.

5.4.3 Допускается работа трансформаторов, имеющих охлаждение ДЦ или Ц, при полном или частичном отключении вентиляторов или прекращении циркуляции воды с сохранением циркуляции масла с нагрузкой до номинальной включительно, если температура верхних слоев масла не выше 45 °С.

Допустимая нагрузка трансформатора должна быть уменьшена пропорционально уменьшению числа работающих охладителей систем охлаждения ДЦ, Ц (без учета резервного охладителя), в случае их аварийного отключения» [20].

2.3.1 Исходные положения и допущения

Температура наиболее нагретой точки обмотки зависит от тока данной обмотки и температуры верхних слоев масла, и не зависит от расхода масла через охладители. Данное утверждение заложено во всех

теплогидравлических расчетах и подтверждено экспериментальными данными ПАО «Запорожтрансформатор».

Расход масла и воздуха в замкнутой циркуляционной системе линейно зависят от частоты вращения (согласно «Инструкциям по расчету экономической эффективности применения частотно-регулируемого электропривода» согласованного с Главгосэнергонадзором и утвержденной Минтеплоэнерго России от 19.12.1995г).

«Тепловая мощность системы охлаждения Q_{co} принимается равной номинальной мощности тепловых потерь трансформатора, хотя на самом деле она составляет 180 кВт на каждый охладитель. Дополнительные охладители подключаются ступенчато» [20].

2.3.2 Уставки

«Уставками являются:

- допустимая температура наиболее нагретой точки обмотки $t_{нт\text{доп}}$ (по умолчанию - 98 °С)» [20];
- минимальная частота вращения маслонасосов $n_{мн_min}$ (20 Гц);
- максимальная температура масла T_{max} (75 °С);
- коэффициент запаса k_z ;
- коэффициент сдвига - k_s ;
- коэффициент наклона - k_n ;

Все уставки являются редактируемыми.

2.3.3 Данные, получаемые с КИП

«Исходными данными, получаемыми с датчиков, являются:

- $I_{вн}$ - ток высокого напряжения;
- $I_{сн}$ - ток среднего напряжения;
- $I_{нн}$ - ток низкого напряжения» [20];
- $t_{тр}$ - температура трубопровода;
- $t_{в}$ - температура окружающего воздуха.

2.3.4 Принцип работы алгоритма

«В основу алгоритма заложен принцип регулирования по двум величинам - по общему тепловыделению в трансформаторе и по расчетной температуре верхних слоев масла. Отвод теплотерь поддерживается расходом масла (раздел 2.3.5.4), температура верхних слоев масла - вентиляторами (раздел 2.3.5.5)» [20].

2.3.4.1 Расчет тепловыделения в трансформаторе АТ1 АТДЦТН-250000/220/110

«Сопротивление обмотки высокого напряжения $R_{ВН}$ » [20]:

$$R_{ВН} = \frac{(230)^2}{2 \cdot 250000^2} \cdot (P_{КВН-СН} + P_{КВН-НН} - P_{КСН-НН}) \cdot 1000 = 0,203 \text{ Ом.}$$

где $P_{КВН-СН}$, $P_{КВН-НН}$, $P_{КСН-НН}$ - паспортные значения потерь КЗ в автотрансформаторе АТ1.

«Сопротивление обмотки среднего напряжения $R_{СН}$ » [20]:

$$R_{СН} = \frac{(230)^2}{2 \cdot 250000^2} \cdot (P_{КВН-СН} + P_{КСН-НН} - P_{КВН-НН}) \cdot 1000 = 0,207 \text{ Ом.}$$

«Сопротивление обмотки низкого напряжения $R_{НН}$ » [20]:

$$R_{НН} = \frac{(230)^2}{2 \cdot 250000^2} \cdot (P_{КВН-НН} + P_{КСН-НН} - P_{КВН-СН}) \cdot 1000 = 0,135 \text{ Ом.}$$

Потери короткого замыкания:

$$\Delta P_{КВН} = I_{ВН}^2 \cdot \frac{R_{ВН}}{1000}; \quad (1)$$

$$\Delta P_{КВН} = I_{ВН}^2 \cdot 0,0002031 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{K_{CH}} = \left(I_{CH}^2 \cdot \frac{121}{230} \right)^2 \cdot \frac{R_{CH}}{1000}; \quad (2)$$

$$\Delta P_{K_{CH}} = I_{CH}^2 \cdot 0,0000574 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{K_{HH}} = \left(I_{HH}^2 \cdot \frac{10,5}{230} \right)^2 \cdot \frac{R_{HH}}{1000}; \quad (3)$$

$$\Delta P_{K_{HH}} = I_{HH}^2 \cdot 0,0000002822 \text{ кВт}.$$

Полные потери в трансформаторе рассчитываются как:

$$\Delta P_{TP} = \Delta P_{XX} + \Delta P_{K_{BH}} + \Delta P_{K_{CH}} + \Delta P_{K_{HH}}; \quad (4)$$

$$\Delta P_{TP} = 105 + I_{BH}^2 \cdot 0,0002031 + I_{CH}^2 \cdot 0,0000574 + I_{HH}^2 \cdot 0,0000002822 \text{ кВт}.$$

В расчетах принимаем тепловую мощность потерь Q_{TP} приближенно равной электрической ΔP_{TP} .

2.3.4.2 Расчет тепловыделения в трансформаторе АТ2 АТДЦТН-250000/220/110

«Сопротивление обмотки высокого напряжения R_{BH} » [20]:

$$R_{CH} = \frac{(230)^2}{2 \cdot 250000^2} \cdot (P_{K_{BH-CH}} + P_{K_{CH-HH}} - P_{K_{BH-HH}}) \cdot 1000 = 0,206 \text{ Ом}.$$

«Сопротивление обмотки среднего напряжения R_{CH} » [20]:

$$R_{CH} = \frac{(230)^2}{2 \cdot 250000^2} \cdot (P_{K_{BH-CH}} + P_{K_{CH-HH}} - P_{K_{BH-HH}}) \cdot 1000 = 0,201 \text{ Ом}.$$

«Сопротивление обмотки низкого напряжения R_{HH} » [20]:

$$R_{HH} = \frac{(230)^2}{2 \cdot 250000^2} \cdot (P_{K_{BH-HH}} + P_{K_{CH-HH}} - P_{K_{BH-CH}}) \cdot 1000 = 0,144 \text{ Ом}.$$

Потери короткого замыкания:

$$\Delta P_{кВН} = I_{ВН}^2 \cdot 0,0002057 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{кСН} = I_{СН}^2 \cdot 0,00005575 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{кНН} = I_{НН}^2 \cdot 0,0000002999 \text{ кВт}.$$

«Полные потери в трансформаторе рассчитываются как» [20]:

$$\Delta P_{TP} = 107 + I_{ВН}^2 \cdot 0,0002057 + I_{СН}^2 \cdot 0,00005575 + I_{НН}^2 \cdot 0,0000002999 \text{ кВт}.$$

2.3.4.3 Расчет температуры верхних слоев масла

«Для трансформаторов производится измерение температуры стенки трубопровода накладным датчиком температуры, следовательно, для нахождения температуры масла в трубопроводе от бака необходимо решить задачу теплопроводности. Т.к. диаметр трубопровода много больше толщины стенки то можно пользоваться уравнением теплопроводности для плоской стенки» [16].

Для нахождения температуры стенки необходимо найти плотность теплового потока q :

$$q = \frac{t_m - t_g}{\frac{1}{\alpha_m} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\delta_{му}}{\lambda_{му}} + \frac{1}{\alpha_g}}, \quad (5)$$

$$q = \frac{t_m - t_g}{0,05 + 0,00008 + 1,42 + 0,185} = 0,604(t_m - t_g),$$

где « t_m - температура масла ($^{\circ}\text{C}$);

t_g - температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$);

α_m - коэффициент теплоотдачи жидкость-стенка - 20 Вт/($\text{м}^2 \text{ K}$);

α_g - коэффициент теплоотдачи стенка-воздух – 5,4 Вт/($\text{м}^2 \text{ K}$);

$\delta_{ст}$ - толщина стали – 0,004 м;

$\delta_{ти}$ - толщина теплоизоляции – 0,05 м;

$\lambda_{ст}$ - коэффициент теплопроводности стали - 50 Вт/(м К) ;

$\lambda_{ти}$ - коэффициент теплопроводности теплоизоляции – 0,034 Вт/(м К)» [16].

«Тогда температура стенки будет равняться» [16]:

$$t_{cm} = t_m - q \left(\frac{1}{\alpha_m} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} \right), \quad (6)$$

$$t_{cm} = t_m - 0,604 \cdot (t_m + t_g) \cdot 0,05008 = 0,97t_{всм} - 0,03t_g.$$

Тогда

$$t_{всм} = \frac{t_{cm} + 0,03t_g}{0,97}. \quad (7)$$

2.3.4.4 Расчет частоты вращения маслонасосов

«На расходах свыше 30% от номинального течение масла в трубках явно остается турбулентным, т.е. число Нуссельта и следовательно коэффициент теплоотдачи со стороны масла будут пропорционален отношению текущего расхода масла G_M к номинальному расхода масла $G_{M.НОМ}$ в степени 0.8» [20], т.е:

$$\frac{Q_{ТР}}{Q_{СО}} = \left(\frac{G_M}{G_{M.НОМ}} \right)^{0,8}. \quad (8)$$

На рисунке 11 показаны зависимости изменения расхода масла при изменении тепловой мощности.

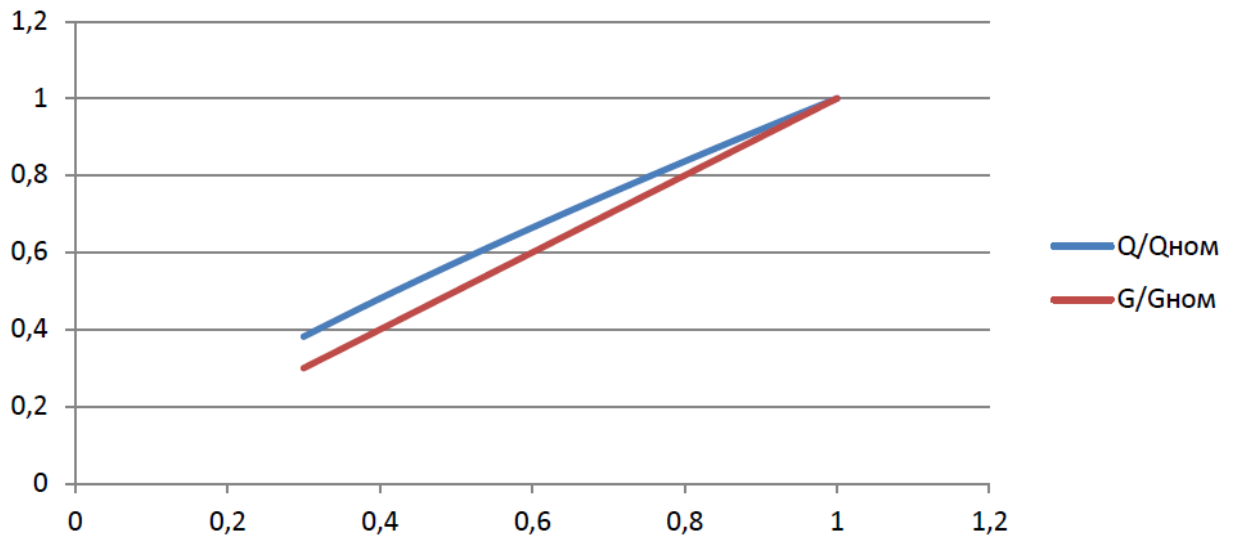


Рисунок 11 - Зависимость изменения расхода масла при изменении тепловой мощности

«Расход масла через систему охлаждения не опускается ниже 30%. В целях запаса по расходу примем зависимость тепловой мощности от расхода линейной, т.е.» [16]:

$$\frac{Q_{TP}}{Q_{CO}} = \frac{G_M}{G_{M.HOM}}. \quad (9)$$

«Частота вращения маслонасосов n_{MH} линейно зависит от расхода масла G_M . В данном алгоритме регулирования расход масла G_M зависит от общих потерь в трансформаторе Q_{TP} » [16]:

$$\frac{n_{MH}}{n_{MH.HOM}} = \frac{Q_{TP}}{Q_{CO}}. \quad (10)$$

В целях повышения надежности при высоких нагрузках частота вращения маслонасосов будет регулироваться не линейно, а по сигма-кривой. Параметры сигма-регулирования задаются в настройках:

$$n_{\text{MH}} = \left(\frac{n_{\text{min}}}{50} + \left(1 - \frac{n_{\text{min}}}{50} \right) \cdot \frac{1}{1 + \exp \left[-1 \cdot \left(\frac{Q_{\text{тр}} \cdot (1 + k_3)}{690} - k_3 \cdot 0,005 \right) \cdot k_{\text{п}} \cdot 0,1 \right]} \right) \cdot 50. \quad (11)$$

Минимальная частота вращения задается уставкой n_{min} , коэффициент запаса - k_3 , коэффициент сдвига - k_s , коэффициент наклона - k_n . Вид зависимости частоты вращения от загрузки приведен на рисунке 12.

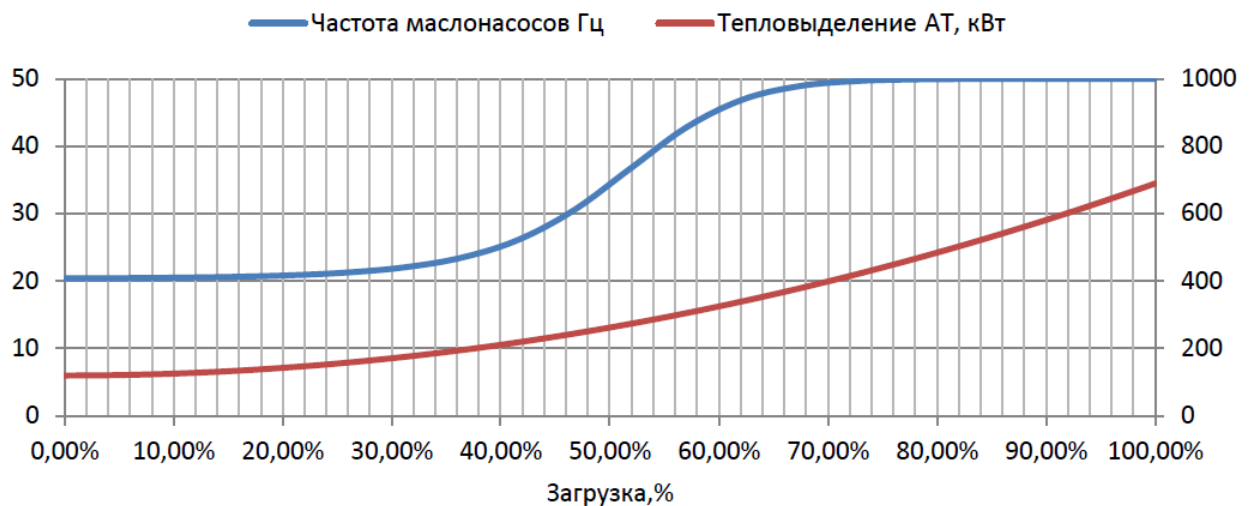


Рисунок 12 - Вид зависимости частоты вращения от загрузки

2.3.4.5 Регулирование частоты вращения вентиляторов

«Частота вращения вентиляторов регулируется по ПИД-закону с плавающей уставкой $t_{\text{всм.доп}}$. Для того чтобы найти эту уставку, необходимо найти максимальный из перегревов обмоток над маслом.

Формула для перегрева общей обмотки над маслом $DT_{\text{ннтОО}}$ [16]:

$$DT_{\text{ннтОО}} = 60.23 \cdot ((I_{\text{сн}} - I_{\text{вн}}) / 552)^{1.4564}. \quad (12)$$

«Формула для перегрева последовательной обмотки над маслом $DT_{\text{нитПО}}$ » [16]:

$$DT_{\text{нитПО}} = 49,21 \cdot (I_{\text{вн}} / 979,1)^{1,0722}. \quad (13)$$

«Далее из этих двух значений DT выбирается максимальное DT_{max} .

Допустимая температура верхних слоев масла $t_{\text{всм.доп}}$ рассчитывается как» [16]:

$$t_{\text{всм.доп}} = t_{\text{нитдоп}} - DT_{\text{max}}. \quad (14)$$

«Если значение $t_{\text{всм.}}$ и $t_{\text{всм.доп}}$ не превышает уставки номинальной температуры масла, то частота вращения вентиляторов регулируется по ПИД-закону с регулирующим параметром $t_{\text{всм}}$ и уставкой $t_{\text{всм.доп}}$, при превышении температуры вентиляторы работают на номинальной производительности» [16].

2.3.4.6 Корректировка частоты вращения маслонасосов

При превышении $t_{\text{всм}}$ над $t_{\text{всм.доп}}$ более, чем на $dT_{\text{корр}}$ необходимо повышать частоту вращения маслонасосов по следующему закону:

$$n_{\text{МН}}^{\text{корр}} = n_{\text{МН}} + (t_{\text{всм}} - t_{\text{всм.доп}}) \cdot k_{\text{корр}}, \quad (15)$$

где $k_{\text{корр}}$ - коэффициент корректировки.

При таком превышении температуры ПИД-регулятор выводит вентиляторы на частоту 50 Гц.

На рисунке 13 представлена блок-схема алгоритма, описанного в подразделе 2.3.

На трансформаторах с принудительной циркуляцией воздуха и масла (охлаждение вида ДЦ, НДЦ) и на трансформаторах с принудительной циркуляцией воды и масла (охлаждение вида Ц, НЦ) устройства охлаждения должны автоматически включаться (отключаться) одновременно с включением (отключением) трансформатора, если не оговорено иначе в заводском руководстве по эксплуатации. Принудительная циркуляция масла должна быть непрерывной независимо от нагрузки. Порядок включения (отключения) системы охлаждения должен быть определен в заводском руководстве по эксплуатации и может предусматривать, например, (особенно в новых трансформаторах), включение циркуляции масла при достижении нагрузки 60 % номинальной.

При номинальной нагрузке разность температур масла на входе и выходе из охладителя Ц (НЦ) должна быть не менее 10 °С.

Допускается работа трансформаторов, имеющих охлаждение ДЦ или Ц, при полном или частичном отключении вентиляторов или прекращении циркуляции воды с сохранением циркуляции масла с нагрузкой до номинальной включительно, если температура верхних слоев масла не выше 45 °С.

«Допустимая нагрузка трансформатора должна быть уменьшена пропорционально уменьшению числа работающих охладителей систем охлаждения ДЦ, Ц (без учета резервного охладителя), в случае их аварийного отключения» [20].

«При этом в целях повышения надежности сохраняется возможность перехода на существующую схему охлаждения трансформатора путем передачи управления системой охлаждения существующему ШАОТ» [5].

2.4.1 Состав АСУ ОТ

«АТ1, АТ2 трехфазные автотрансформаторы типа АТДЦТН-250000/220/110 У1, каждый оснащен 6 охладителями, в составе каждого маслонасос мощностью 2,9 кВт и два вентилятора мощностью 2,2 кВт каждый, один из охладителей резервный» [5].

Защита от потери охлаждения АТ имеет следующий алгоритм работы:

- через 60 мин после отключения основного и резервного питания ШАОТ-ДЦ;
- через 30 мин после отключения основного и резервного питания ШАОТ-ДЦ, при токе нагрузки АТ менее номинального тока и $T_{всм} 75^{\circ}\text{C}$;
- через 10 мин после отключения основного и резервного питания ШАОТ-ДЦ, повышении тока нагрузки АТ до 100 % от номинального тока и $T_{всм} 75^{\circ}\text{C}$.

«Управление частотными преобразователями двигателей будет осуществляться через один программируемый логический контроллер (ПЛК).

ПЛК также будет осуществлять следующие функции: обеспечение сбора и регистрации всех параметров регулирования и событий, происходящих в АСУ ОТ; отображение всех текущих и архивных параметров регулирования, текущее состояние элементов АСУ ОТ и хронологию их изменения; экспорт архивных данных в файл формата MS EXCEL с возможностью записи на внешний носитель; осуществление глубины архива, достаточной для анализа работы АСУ ОТ за время опытной эксплуатации (не менее 3 месяцев, с интервалом 1 минута).

Для размещения данного количества ПЧ и сопутствующего оборудования предусмотрено контейнерное исполнение АСУ ОТ (с возможностью автоматического поддержания внутреннего микроклимата)» [5]. Конструкция контейнера представляет собой блочно-модульное быстровозводимое здание.

Здание имеет металлический каркас, к которому внутри с помощью самонарезающих шурупов крепятся сэндвич панели (толщина внутреннего и внешнего листа – 0,5 мм, наполнитель – минеральная вата, покрытие – полиэстер), пол контейнера металлический, крыша покрыта кровельным железом.

Контейнер снабжен системой кондиционирования для поддержания внутренней температуры в требуемых границах и системой пожаротушения. Внешний вид контейнера представлен ниже на рисунке 14.

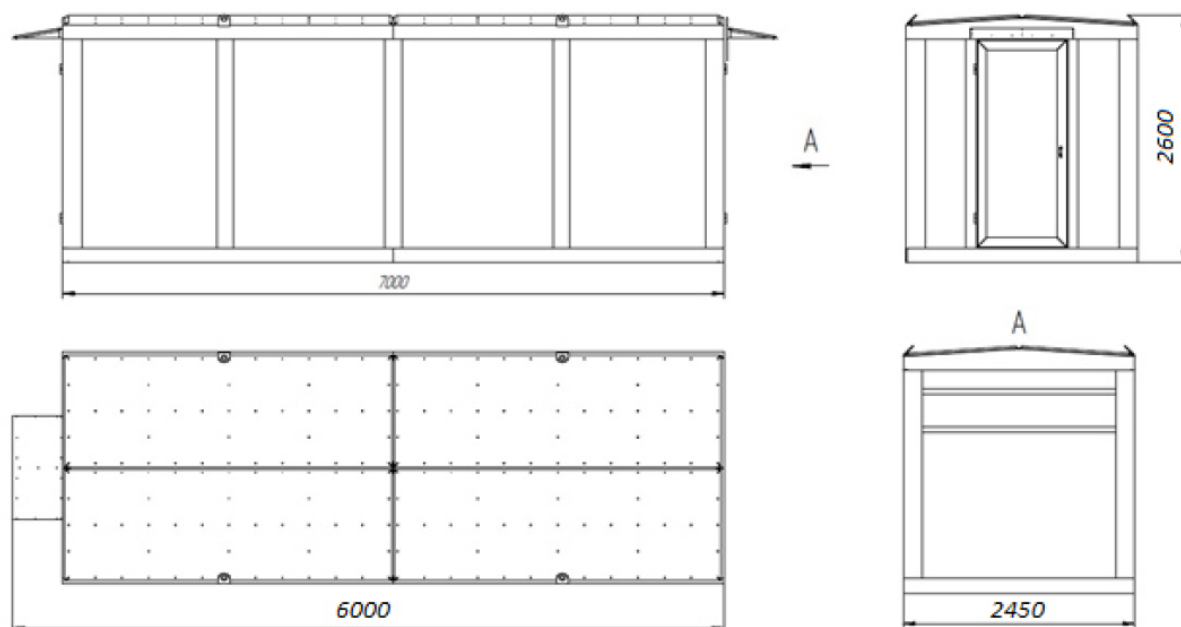


Рисунок 14 - Габаритный чертеж контейнера с оборудованием

Внутри контейнера оборудование будет размещаться в специализированных стойках, представляющих собой металлический каркас с дверью. В стойках с силовыми элементами оборудование будет закреплено на металлическую перфорацию, в стойках с элементами управления будет размещена монтажная панель из оцинковки. Каждая стойка оборудована дверью с ключом (ключи для всех стоек одинаковые). На дверях стоек, в которых будет размещена система АВР, будут размещены ваттметры и приборы АВР. Цвет стоек – серый RAL 7004 (под цвет металлических элементов контейнера). Кроме того, в контейнере предполагается организация автоматизированного рабочего места (АРМ). АРМ представляет собой промышленную жидкокристаллическую панель с диагональю 15 дюймов. Панель врезается в дверь одной из стоек. Постоянного места, оборудованного для пребывания персонала в контейнере не предусмотрено, в связи с этим,

окна в контейнере не предусмотрены. Рядом с панелью АРМ будут расположены кнопки «Пуск», «Стоп», «Сброс ошибки».

Основное и резервное питание контейнера будет осуществлено от нового распределительного шкафа.

Основное оборудование систем управления охлаждением АТ1, АТ2 расположено в контейнере климатического исполнения категории УХЛ1.

Оборудование для переключения маслонасосов и вентиляторов на питание от существующих ШАОТ или от контейнера АСУ ОТ расположено в шкафах коммутации двигателей.

В здании ОПУ будет дополнительно расположено автоматизированное рабочее место, для удаленного наблюдения за показаниями приборов и состоянием системы охлаждения в целом и оборудование для связи с контейнером.

Функциональная схема АСУ ОТ представлена на рисунке 15.

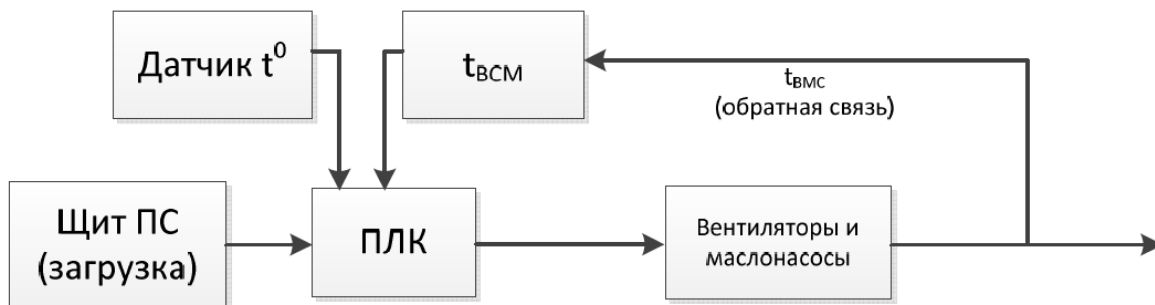


Рисунок 15 - Функциональная схема АСУ ОТ

«В основу алгоритма заложен принцип регулирования по двум величинам - по общему тепловыделению в трансформаторе и по расчетной температуре верхних слоев масла» [5]. Теплотери зависят от загрузки трансформатора и температуры окружающей среды.

2.4.2 Структура АСУ ОТ

«Для управления частотой вращения двигателей вентиляторов и маслонасосов необходимо получать данные о текущей нагрузке

трансформатора и температуре верхних слоев масла в виде цифровых или токовых сигналов» [6].

Для получения данных о температуре верхних слоев масла будет произведена дополнительная установка накладных датчиков температуры с термоизоляцией от внешних воздействий. Сигнал pt100 от датчиков температуры будет поступать в аналоговый цифровой преобразователь для дальнейшей передачи в контроллер.

Данные о загрузке автотрансформаторов АТ1, АТ2 будут получены путем замены амперметров на цифровые.

2.4.3 Описание системы и алгоритмов работы АСУ ОТ

«АСУ ОТ представляет собой комплектную установку, состоящую из:

- контейнер с расположенными в нем частотными преобразователями и элементами управления системами – 2шт.» [6];
- шкафы с ЧРП – 4 шт. (по одному на четыре блока охладителей);
- шкафы с прямым пуском – 2 шт. (по одному на каждый резервный блок охладителей);
- шкаф коммутации двигателей – 2 шт.;
- шкаф АВР – 2 шт.;
- шкаф СН – 2 шт.;
- шкаф управления АСУ ОТ – 2 шт.

«Процесс охлаждения осуществляется за счет параллельной работы 3-х охладителей (одновременный пуск всех вентиляторов и работа их на одинаковой частоте, одновременный пуск маслонасосов и работа их на одной частоте)» [3]. Один охладитель находится в резерве.

Элементы системы:

- контейнер

Габаритные размеры Ш×В×Г: 2450×2600×6000 мм

- «АВР:

В контейнере расположен 1 блок АВР, на него подключаются два питающих кабеля (основное и резервное питание). АВР работает с приоритетом на основное питание.

От АВР запитаны шкафы с ПЧ и шкаф прямого пуска резервного охладителя.

После каждого АВР установлен счетчик электроэнергии для измерения и контроля потребляемой системой мощности» [5]. Счетчики э/э подключаются к управляющему контроллеру посредством импульсного выхода (для обеспечения надежности передачи данных).

– преобразователи частоты:

«Все преобразователи частоты сгруппированы в стойках в контейнере по охладителям, т.е. в одной стойке расположены ПЧ относящиеся к одному охладителю.

Каждый ПЧ получает задание от управляющего контроллера в виде аналогового сигнала 4-20 мА, а также передает в ПЛК значение выходной частоты, так же посредством аналогового сигнала 4-20 мА.

Задание значения частоты вращения для всех маслонасосов (общее задание) и всех вентиляторов (общее задание) автотрансформатора группы управляющий контроллер осуществляет по установленному алгоритму. Исходными данными для выбора являются данные с датчиков температуры и данные по загрузке трансформатора» [5].

– шкаф коммутации двигателей (ШКД).

«Переключение питающих линий электромоторов (маслонасосов и вентиляторов) на питание от системы (ШАОТ) или от новой системы (контейнер АСУ ОТ). Переключение производится с помощью реверсивных магнитных пускателей. Защита от одновременного включения обеспечивается, как механической блокировкой, так и логически» [5].

Временной выдержки при переключении не производится.

Для обеспечения автономности работы ШКД при замыкании цепей от ШАОТ в ШКД осуществлено дополнительное питание 220В АС

непосредственно с входящих со стороны ШАОТ кабелей соответствующих двигателей.

«Запуск и остановка новой системы АСУ ОТ АТ1, АТ2:

Запуск всех электромоторов (маслонасосов и вентиляторов) всех охладителей, не находящихся в резерве, производится одним сигналом «Пуск». Этим же сигналом происходит переключение системы охлаждения трансформатора с существующей на новую (переключение выходных реверсивных пускателей в ШКД).

Сигнал «Стоп» останавливает все работающие привода и производит переключение на существующую систему ШАОТ.

Исчезновение сигнала «Пуск новой системы» также является условием для аварийного перехода на существующую систему ШАОТ.

Система ШАОТ является приоритетной и в отсутствии сигнала «Пуск» работает в штатном режиме. Новая система не выдает сигналов на запуск существующей системы или её остановку» [5].

Частичная работа охладителей от новой системы, а частично от существующей невозможна.

2.4.4 Резервирование АСУ ОТ АТ1, АТ2

АСУ ОТ АТ1, АТ2.

В процессе работы один из охладителей трансформатора может быть выведен в резерв.

Выбор и перевод охладителя в резерв, осуществляется на панели визуализации расположенной в контейнере, как показано на рисунке 16 (представлен пример мнемосхемы).

Резервный охладитель может быть автоматически введен в работу только при аварии одного из работающих (активных) охладителей.

В случае неисправности АСУ ОТ АТ1, АТ2 управление переходит на ШАОТ.



Рисунок 16 - Выбор резервного охладителя

2.4.5 Переключение на ШАОТ

«Дополнительно, в качестве резервной системы управления охлаждением используется шкаф ШАОТ.

Переключение на ШАОТ происходит следующим образом:

- кнопкой (физическая кнопка, функционирует даже при неисправном ПЛК), установленной в контейнере АСУ ОТ, система переводится на работу от существующих ШАОТ» [5].

При этом: на начальном этапе срабатывают контакторы стороны АСУ ОТ (ШКД) на отключение, затем срабатывают контакторы стороны ШАОТ без задержки по времени и без снижения частоты вращения работающих двигателей вентиляторов и маслонасосов.

«Индикация о состоянии силовых вводов питания отображается на мнемосхеме панели визуализации, расположенной в контейнере и АРМ в ОПУ.

- автоматический переход на ШАОТ при одном из следующих условий:

- Выход из строя элементов более чем одной секции управления охладителями (одна секция управляет одним охладителем, при выходе из строя элементов одной секции включается, та, что управляет охладителем, выбранным как резервный, при выходе из строя ещё одной секции система автоматически переходит на существующие ШАОТ).
- Превышение температуры верхних слоев масла критической уставки (уставка задается в панели визуализации расположенной в контейнере).
- Отключение питания контроллера, расположенного в контейнере, неисправность контроллера» [5].

Также предусмотрена индикация в ОПУ типа «сухой контакт» о состоянии системы «работа», «авария».

Вся информация, выводимая на панель визуализации в контейнере, так же может быть передана в операторскую подстанции по интерфейсу Ethernet протокол Modbus TCP IP, при условии обеспечения:

- канала передачи информации из контейнера в операторскую;
- средств отображения информации в операторской, в качестве устройства отображения информации может использоваться персональный компьютер или панель визуализации аналогичная установленной в контейнере (того же производителя и программирующаяся в той же среде разработки).

2.5 Решения по электромагнитной совместимости устройств

«Вторичное оборудование электрических станций и подстанций (в первую очередь – микропроцессорная аппаратура) может подвергаться воздействию электромагнитных помех. Наиболее опасными источниками помех являются электрические процессы в первичных сетях подстанций (в штатном режиме, при коммутациях и коротких замыканиях). Также опасность

могут представлять помехи при молниевых разрядах, поля от внешних источников радиочастотного поля, различные внутренние источники помех во вторичных цепях, электростатика и т.п» [19].

«Поэтому, для разработки обоснованных технических решений по обеспечению ЭМС представляется целесообразным проведение работы по определению электромагнитной обстановки на указанном объекте и разработке защитных мероприятий в соответствии с требованиями ЭМС. Для того, чтобы ЭМС вторичного оборудования обеспечивалась, должны быть выполнены следующие три условия» [22], [23], [29] и [30]:

- «электронные устройства должны проходить испытания на помехоустойчивость по классам жесткости испытаний, определяемым соответствующими государственными и отраслевыми нормативными документами для применения на энергообъектах со свойственной им жесткой ЭМО» [14], [24].
- «на энергообъектах уровни полей и помех, воздействующих на электронные устройства, не должны превышать значений, при которых обеспечивается устойчивая работа этих устройств» [19], [22], [30], «при этом предполагается, что данные устройства испытаны на ЭМС в соответствии с действующей НТД» [14], [24].
- «уровни разностей потенциалов, прикладываемых к изоляции вторичных цепей, не должны превышать допустимые нормы, перенапряжения, приложенные к элементам электрических схем, не должны превышать предельно-допустимых уровней, указанных для данных элементов» [14], [24].

На ПС «Южная» планируется реконструкция, включающая в себя установку новой МП аппаратуры для автотрансформаторов.

В районе расположения ПС уровень грозовой активности составляет 40-60 часов в год [18].

Глубина промерзания грунта в зимний период принимается равным 1,1 м (согласно карте нормативных глубин промерзания грунтов в [21]). Согласно

[28] сезонный коэффициент изменения удельного сопротивления грунта ПС принимается равным 3. Согласно представленным данным удельное сопротивление грунта, приведенное к двухслойной модели представлено ниже:

- «лето: ρ верхнего слоя – 76 Ом·м, нижнего слоя – 31 Ом·м, толщина верхнего слоя – 7 м» [28].
- зима: ρ верхнего слоя – 228 Ом·м, нижнего слоя – 31 Ом·м, толщина верхнего слоя – 1,1 м.

План-схема рассматриваемого оборудования возле АТ1 и АТ2 представлена на рисунке 17.

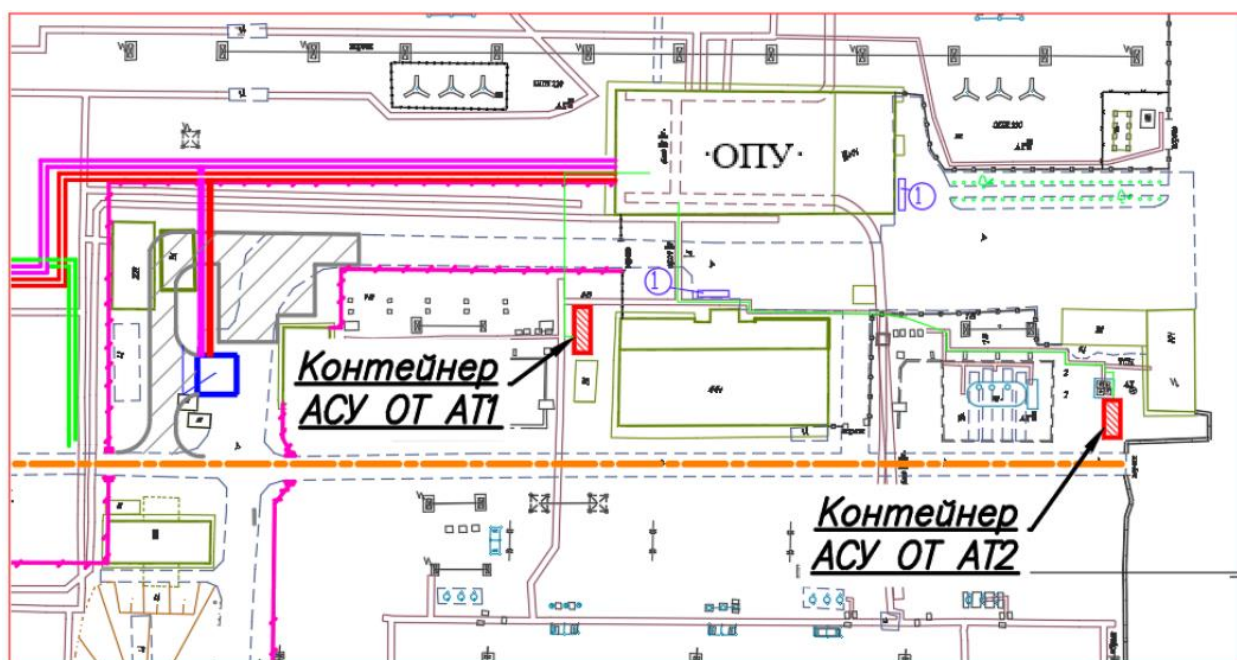


Рисунок 17 - План-расстановки нового оборудования

На ПС проходит следующий объем реконструкции (таблица 7):

Основные особенности компоновки, места расположения МП аппаратуры, устанавливаемой на объекте, и других факторов, влияющие на ЭМО, следующие:

- близкое расположение контейнеров АСУ ОТ к ошиновкам силового оборудования позволяет ожидать высокий уровень напряженности

магнитного поля в помещении с новой аппаратурой в нормальном режиме и при КЗ.

- стальное напольное покрытие в контейнере АСУ ОТ позволяет исключить возникновение статических разрядов.

Таблица 7 - Объем проводимой реконструкции

Системы	Предусмотрено ли модернизация либо строительство	Объем работ
Система молниезащиты	нет	-
Заземляющее устройство	да	организация заземления шкафов Контейнеров АСУ ОТ АТ1 и 2 АТ, ШКД АТ1 и АТ2.
Трасса прокладки вторичных цепей	да	организация новых трасс прокладки цепей: - от здания ОПУ до контейнеров АСУ ОТ (оптический кабель) - от ШАОТ до контейнеров АСУ ОТ - от АСУ ОТ до ШКД - от ШКД до ШАОТ - от ШАОТ до АТ1 и АТ2.
ОРУ 550 кВ	нет	-
ОРУ 220 кВ	нет	-
ОРУ 110 кВ	нет	-
РУ 10 кВ	нет	-
МП аппаратура	да	установка новой аппаратуры в ОПУ (АРМ) и в контейнерах АСУ ОТ
Система собственных нужд	да	Организация электроснабжения переменным током нового оборудования в ОПУ (АРМ) и контейнере АСУОТ.
Система оперативного постоянного тока	да	Организация электроснабжения переменным током нового оборудования в ОПУ (АРМ) и контейнерах АСУ ОТ АТ1, АТ2
СУП в помещениях с МП аппаратурой	да	Осуществление заземления нового оборудования в ОПУ на существующую СУП.

2.5.1 Устройство заземления и систем уравнивания потенциалов объекта

Значительные размеры ПС, а также высокая амплитуда вероятного импульса тока молнии предъявляют повышенные требования к организации заземления нового оборудования, устанавливаемого на объекте.

Модернизация существующего ЗУ ПС и СУП существующих зданий не предусмотрена.

Заземление контейнера АСУ ОТ и ШАОТ рекомендуется выполнить двойным стальным оцинкованным заземляющим проводником сечением $50 \times 5 \text{ мм}^2$ на ближайшие существующие заземлители. Вокруг контейнера АСУ ОТ и ШАОТ выполнить периметральный заземлитель. Присоединение новых заземлителей с существующими заземлителями осуществлять на максимальном удалении от элементов системы молниезащиты.

2.5.2 Выбор сечения заземлителей и заземляющих проводников

При выборе параметров новых элементов ЗУ необходимо учитывать требования [11], [12], [13], [17], [18], [19], [25], [28], [30]:

- толщине прямоугольного заземлителя ([32]);
- минимальному сечению [19] п.2.1, [30] пп.8.2.1.7, 8.2.1.8, 8.3.4, [25] п.8.9, [28] п.15.2.6;
- допустимому нагреву (400°C) [25] п.6, [28] п.15.2.6., [17], п.1.4.16 и [18] пп. 1.7.111-114;
- допустимому нагреву изоляции вторичных цепей и заземляющих проводников имеющих прямой контакт с изоляцией вторичных цепей (150°C согласно [28] таблица 1 и [17] п.1.4.16);
- способу связи заземлителей и заземляющих проводников сваркой «внахлест» ([31], [32]).

Ниже представлена таблица 8 с параметрами новых и существующих заземлителей и заземляющих проводников.

2.5.3 Заземление МП аппаратуры

Защитное заземление выполнить путем присоединения (желательно, сваркой) металлоконструкции с оборудованием к элементам СУП помещения по кратчайшему пути. «При этом должен обеспечиваться надежный электрический контакт корпуса (клеммы РЕ) МП аппаратуры с металлоконструкциями (шкафами, панелями и т.п.), в которых она установлена» [22].

Таблица 8 - Параметры заземляющих проводников и горизонтальных заземлителей

РУ, кВ	Материал, форма и количество заземлителей	Суммарное сечение, мм	Нагрев элемента ЗУ с учетом коррозии, °С	Заключение о возможности использования
Проектируемые элементы ЗУ				
Проектируемые заземляющие проводники				
ШАОТ, контейнер АСУ ОТ	Сталь оцинкованная, полоса (5x50),2	500	186	уд.
Проектируемые заземлители				
ШАОТ, контейнер АСУ ОТ	Сталь оцинкованная, полоса (5x50),1	250	186	уд.

«В помещении в МП аппаратурой РЕ-проводники в щитах питания, а также в штепсельных розетках, через которые будет осуществляться питание аппаратуры, рекомендуется соединить с сеткой уравнивания потенциалов или с ближайшим заземлителем. Для критически важной аппаратуры, даже при наличии третьего (РЕ) электрода в розетках, должно быть выполнено дополнительное неразъемное соединение корпуса с системой заземления» [7].

2.5.4 Мероприятия по электробезопасности

Для защиты персонала от воздействия напряжения шага/прикосновения на площадках на рабочих местах и территории вокруг ШАОТ, ШКД, и контейнеров АСУ ОТ планируется выполнить гравийную подсыпку толщиной слоя не менее 10 см. Данное мероприятие позволит снизить уровни напряжения шага/прикосновения до безопасного уровня.

2.5.5 Установка УЗИП

Подъем импульсного потенциала в цепях СН при ударе молнии в молниеотводные мачты, на которых установлены прожектора, может создать угрозу для МП аппаратуры. Для снижения разности потенциалов до нормируемого значения, необходимо установить УЗИП согласно [26] (п.8.3).

Ниже (таблица 9) представлен список мероприятий по защите вторичных цепей и МП аппаратуры от импульсных перенапряжений с помощью УЗИП.

Таблица 9 - Установка УЗИП

№ группы цепей	Цепи	Защитные мероприятия
4	Цепи СН	Установить комбинированный УЗИП 1,2 классов защиты на базе варисторов в ЩСН на шины, от которых выполняется электроснабжение зарядных устройств МП аппаратуры. Так же установить аналогичные УЗИП 1,2 класса на вводе в ШАОТ и ШКД и контейнерах АСУ ОТ.

2.5.6 Организация электроснабжения постоянным током

От существующего ЩПТ здания ОПУ будет получать электроснабжение устанавливаемый шкаф АРМ в здании ОПУ.

Вторичные цепи электроснабжения шкафа АРМ необходимо выполнить экранированным кабелем согласно требованиям действующей НТД [30] (п. 9.2.7).

2.5.7 Организация электроснабжения переменным током

Электроснабжение переменным током всех потребителей на территории ПС осуществляется от трансформаторов СН, расположенных возле ОПУ. Система электроснабжения в здании ОПУ выполнена по схеме TN-C-S. Заземление нейтрали осуществляется как в ЩСН, так и на ТСН, что не удовлетворяет требованиям НТД ([28] п.12.5 и [27] п.8.1). В рамках отдельной работы для исключения угрозы выброса потенциала в сети собственных нужд, необходимо разземлить нейтраль на ТСН, оставив заземленной нейтраль только в ЩСН. При этом запрещено повторное заземление N-проводника.

2.5.8 Система молниезащиты объекта

Согласно предоставленным данным, существующая система молниезащиты обеспечивает защиту рассматриваемого оборудования и трассы прокладки вторичных цепей на рассматриваемой территории объекта.

Модернизация системы молниезащиты для обеспечения нового оборудования в раках данной работы не предусмотрена.

2.5.9 Технические решения по экранированию МП аппаратуры

Экранирование МП аппаратуры, размещаемой в контейнере АСУ ОТ, будет осуществляться строительными конструкциями контейнера – стальной лист толщиной не менее 2 мм и стенками шкафов МП аппаратуры толщиной не менее 1 мм. Разработка дополнительных рекомендаций для МП аппаратуры в контейнере АСУ ОТ не требуется.

«Следует разместить МП аппаратуру в экранирующих шкафах толщиной стенок 1,0 мм. В экранирующем шкафу должно быть сведено к минимуму наличие щелей, которые значительно уменьшают экранирующий эффект. Это может быть сделано с помощью комбинированных уплотнителей ЭМС/ПР (например, ЭМС-прокладки), которые обеспечивают герметичный и электрический контакт по всему периметру между панелями и каркасом шкафа. Таким же образом должен обеспечиваться контакт между дверью и корпусом шкафа в закрытом состоянии. При этом поверхности соприкосновения с уплотнителями должны быть либо не окрашены, либо зачищены от непроводящей краски, либо окрашены проводящей краской» [4]. Для экранирования смотровых окон должна быть использована проводящая пленка, которая полностью покрывает смотровое окно шкафа, при этом обеспечивается эффективный контакт с металлоконструкцией шкафа по всему периметру окна.

Разработка дополнительных рекомендаций для МП аппаратуры в контейнерах АСУ ОТ не требуется.

Согласно проектным решениям АРМ в ОПУ планируется установить в металлических шкафах с толщиной стенок по металлу 1мм. Разработка дополнительных рекомендаций для МП аппаратуры в здании ОПУ не требуется в случае, если «МП аппаратура будет размещена в экранирующих шкафах толщиной стенок 1,0 мм. В экранирующем шкафу должно быть сведено к минимуму наличие щелей, которые значительно уменьшают

экранирующий эффект. Это может быть сделано с помощью комбинированных уплотнителей ЭМС/IP (например, ЭМС-прокладки), которые обеспечивают герметичный и электрический контакт по всему периметру между панелями и каркасом шкафа. Таким же образом должен обеспечиваться контакт между дверью и корпусом шкафа в закрытом состоянии. При этом поверхности соприкосновения с уплотнителями должны быть либо не окрашены, либо зачищены от непроводящей краски, либо окрашены проводящей краской» [4]. Для экранирования смотровых окон должна быть использована проводящая пленка, которая полностью покрывает смотровое окно шкафа, при этом обеспечивается эффективный контакт с металлоконструкцией шкафа по всему периметру окна.

2.5.10 Защита от электростатических разрядов

Так как напольное контейнера металлическое, то разработка дополнительных мероприятий по защите от электростатических потенциалов не требуется.

Согласно результатам ранее проведенного обследования [31], уровни электростатических потенциалов в помещении ОПУ не представляют опасности. Дополнительных мероприятий по защите от электростатических потенциалов не требуется.

2.6 Интеграция разработанных решений в системы РЗА подстанции

В рамках реализации данного проекта будут установлены две системы управления охлаждением трансформатора. Основная система – автоматизированная система управления охлаждением трансформатора (АСУ ОТ) на основе частотно регулируемого привода (ЧРП), вторая – существующий ШАОТ (в качестве резервной).

В рамках реализации АСУ ОТ АТ1 и АТ2 планируется установка 2х контейнеров.

Будет осуществляться подключение к цепям технологической защиты от потери охлаждения трансформатора (ЗПО) и подключение к цепям сигнализации о неисправности системы охлаждения.

Условия пуска ЗПО:

- потеря питания на обоих вводах АВР (основной и резервный);
- отсутствие питания всех двигателей охладителей при наличии напряжения на автотрансформаторах АТ.

Условие пуска сигнализации о неисправности системы охлаждения:

- зависание контроллера;
- не замыкание контактора переключения двигателей в ШКД.

При остановке АСУ ОТ в ручном режиме или потери основного и резервного питания АСУ ОТ управление системой охлаждения автотрансформатора переходит на ШАОТ, так же эти сигналы будут приходить на табло «Неисправность АСУ ОТ» на ГЩУ по сухому контакту.

Все сигналы, управляющие и информационные, реализуются посредством последовательного включения контакторов АСУ ОТ и прокладкой кабелей КВВГЭнг-Лs 4×1,5мм. Интеграция АСУ ОТ АТ1 и АТ2 предполагается в цепи сигнализации неисправности системы охлаждения и в систему ЗПО (запуск и срабатывание ЗПО).

Система защиты от потери охлаждения подразумевает отключение трансформаторов при потере основного и резервного питания АВР. При потере питания на шкафах одного автотрансформатора, срабатывает технологическая защита - подается сигнал на реле времени и через установленный промежуток времени происходит отключение всей трансформаторной группы. В существующей системе охлаждения автотрансформаторов АТ1 и АТ2 ПС через:

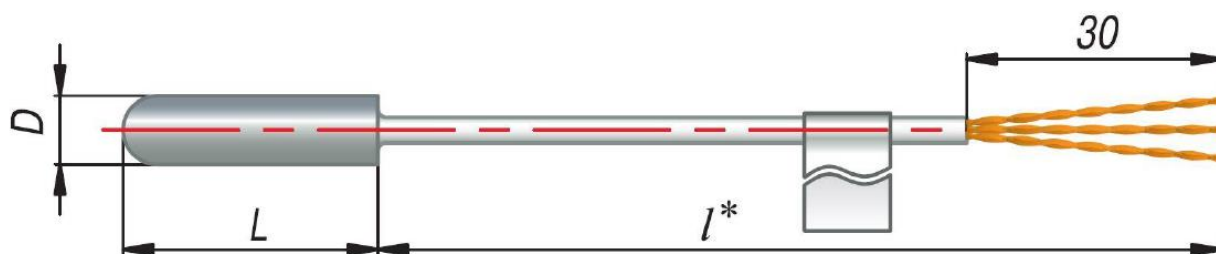
- 10 мин. при нагрузке 100% номинальной и температуре масла $t=75^{\circ}C$;
- 30 мин. при $S < S_{ном}$ и $t=75^{\circ}C$;
- 60 мин. независимо от нагрузки и температуры.

2.6.1 Параллельная работа АСУ ОТ и ШАОТ

2.6.1.1 Работа логических схем ШАОТ

Работа АСУ ОТ совместно с ШАОТ организована так, что при нормальной работе вновь устанавливаемого оборудования в ШАОТ работают все логические цепи, отвечающие за управление маслонасосами и вентиляторами, но отключено питание двигателей маслонасосов и вентиляторов. Таким образом, в любой момент времени ШАОТ находится в состоянии, соответствующем режимам работы трансформатора, и при переключении управления на него (при помощи пускателей, установленных в ШКД АСУ ОТ) выполняется логика работы существующей системы охлаждения.

Для получения данных о температуре верхних слоев масла трансформатора АТ1 и АТ2 и использовании их в алгоритме управления охлаждением планируется применение накладных датчиков температуры Pt100, внешний вид которого показан на рисунке 18.



D-ширина измерительной части термопары (8 мм), L – длина измерительной части термопары (50 мм), l^* -длина кабельной трассы (10 м)

Рисунок 18 - Накладной датчик температуры масла

Датчики будут устанавливаться под слой теплоизоляции на трубопроводы подачи масла из верхних слоев. В ходе ПНР будет произведена корректировка их показания на величину погрешности (в зависимости от температуры окружающей среды).

2.6.1.2 Переключение АСУ ОТ на ШАОТ

Переключение на существующий ШАОТ происходит следующим образом:

- разъединение выходных силовых контактов АСУ ОТ в шкафах коммутации двигателей;
- срабатывание на замыкание выходных силовых контактов от существующих ШАОТ.

АСУ ОТ контролирует положение контакторов ШКД. При несрабатывании контакторов формируется сигнал о неисправности системы охлаждения.

2.6.2 Расчет токов КЗ

Расчет тока КЗ проводился для нескольких точек цепи питания самых удаленных приводов систем охлаждения с целью определения достаточности чувствительности выбранных автоматов защиты.

Схема сети питания оборудования контейнера АСУ ОТ АТ1 и АТ2 представлена на рисунке 19.

Расчет токов КЗ в указанных на схеме точках производился с использованием специализированной программы (GuSets AC), используемой в ПАО «ФСК ЕЭС», и выполняющей расчеты согласно ГОСТ 28249.

2.6.2.1 Результаты расчетов для АТ1

Ток КЗ в точке 1 (проверка нового автомата АВ-200):

Трехфазное металлическое КЗ - $I_{КЗ1} = 6765$ А.

Однофазное дуговое КЗ - $I_{КЗ2} = 3094$ А.

Номинальный ток расцепителя – 200 А (новый автомат ЩСН).

Выбираем уставу магнитного расцепителя – $I_{sd} = 5I_r = 1000$ А. В этом случае коэффициент чувствительности автомата:

$$K_{ч1} = \frac{8102}{1000} = 8,102 \text{ А}; K_{ч2} = \frac{4288}{1000} = 4,288 \text{ А.}$$

Коэффициент чувствительности в соответствии с требованием ПУЭ для автоматических выключателей с номинальным током более 100 А - не менее 1,25.

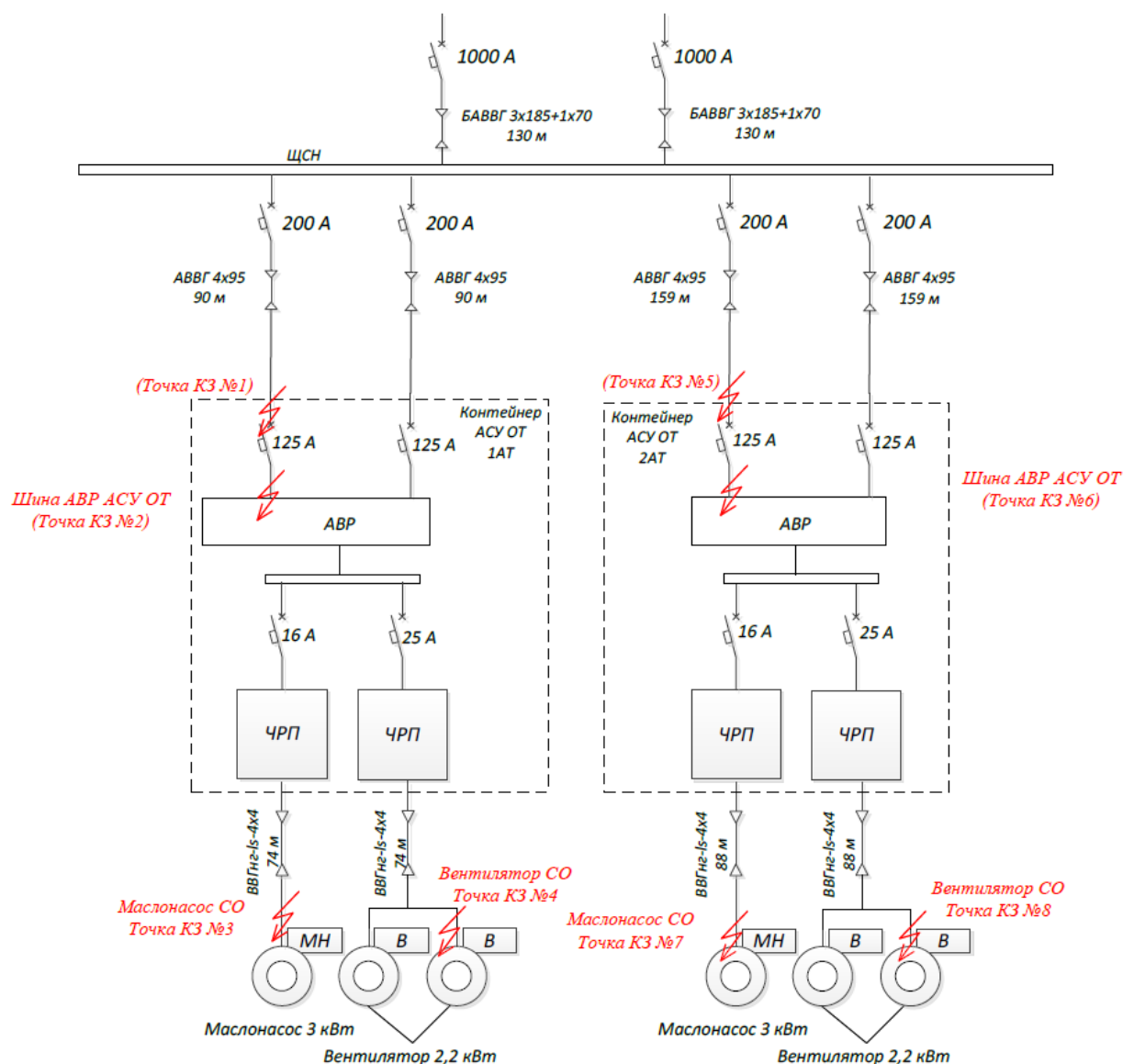


Рисунок 19 – Схема сети питания оборудования АСУ ОТ

Ток КЗ в точке 2 (проверка автомата АВР АСУ ОТ):

Трёхфазное металлическое КЗ - $I_{K31} = 7861 \text{ A}$;

Однофазное дуговое КЗ - $I_{K32} = 4211 \text{ A}$.

Номинальный ток расцепителя – 125 А.

Выбираем уставу магнитного расцепителя – $I_{sd}=9I_r=1125 \text{ A}$. В этом случае коэффициент чувствительности автомата:

$$K_{ч1} = \frac{7861}{750} = 6,98 \text{ А}; K_{ч2} = \frac{1348}{750} = 3,74 \text{ А}.$$

Коэффициент чувствительности в соответствии с требованием ПУЭ для автоматических выключателей с номинальным током более 100 А - не менее 1,25.

Ток КЗ в точке 3 (маслонасос охлаждения):

Трехфазное металлическое КЗ - $I_{КЗ1} = 913 \text{ А}$;

Однофазное дуговое КЗ - $I_{КЗ2} = 431 \text{ А}$.

Номинальный ток расцепителя – 10 А,

Номинал автомата защиты – 16 А (один автоматический выключатель на группу из двух вентиляторов), характеристика срабатывания типа «С». В этом случае коэффициент чувствительности автомата:

$$K_{ч1} = \frac{913}{100} = 9,13 \text{ А}; K_{ч2} = \frac{431}{100} = 4,31 \text{ А}.$$

Коэффициент чувствительности в соответствии с требованием ПУЭ для автоматических выключателей с номинальным током менее 100 А - не менее 1,4.

Ток КЗ в точке 4 (вентилятор охлаждения):

Трехфазное металлическое КЗ - $I_{КЗ1} = 901 \text{ А}$;

Однофазное дуговое КЗ - $I_{КЗ2} = 429 \text{ А}$.

Номинальный ток расцепителя – 10 А,

Номинал автомата защиты – 25 А (один автоматический выключатель на группу из двух вентиляторов), характеристика срабатывания типа «С». В этом случае коэффициент чувствительности автомата:

$$K_{ч1} = \frac{901}{100} = 9,01 \text{ А}; K_{ч2} = \frac{429}{100} = 4,29 \text{ А}.$$

Коэффициент чувствительности в соответствии с требованием ПУЭ для автоматических выключателей с номинальным током менее 100 А - не менее 1,4.

При возникновении КЗ на шинах двигателей вентиляторов и маслонасосов также срабатывает внутренняя защита от токов КЗ преобразователя частоты (ПЧ), что является дополнительной защитой в цепи питания привода.

2.6.2.2 Результаты расчетов для АТ2

Ток КЗ в точке 5 (проверка нового автомата АВ-200):

Трехфазное металлическое КЗ - $I_{КЗ1} = 5417$ А;

Однофазное дуговое КЗ - $I_{КЗ2} = 2873$ А;

Номинальный ток расцепителя – 200 А (новый автомат ЩСН).

Выбираем уставу магнитного расцепителя – $I_{sd}=5I_r=1000$ А. В этом случае коэффициент чувствительности автомата:

$$K_{ч1} = \frac{5417}{1000} = 5,417 \text{ А}; K_{ч2} = \frac{2873}{1000} = 2,873 \text{ А}.$$

Коэффициент чувствительности в соответствии с требованием ПУЭ для автоматических выключателей с номинальным током более 100 А - не менее 1,25.

Ток КЗ в точке 2 (проверка автомата АВР АСУ ОТ):

Трехфазное металлическое КЗ - $I_{КЗ1} = 5309$ А;

Однофазное дуговое КЗ - $I_{КЗ2} = 2839$ А.

Номинальный ток расцепителя – 125 А.

Выбираем уставу магнитного расцепителя – $I_{sd}=7I_r=875$ А. В этом случае коэффициент чувствительности автомата:

$$K_{ч1} = \frac{5309}{875} = 6,06 \text{ А}; K_{ч2} = \frac{2839}{875} = 3,24 \text{ А}.$$

Коэффициент чувствительности в соответствии с требованием ПУЭ для автоматических выключателей с номинальным током более 100 А - не менее 1,25.

Ток КЗ в точке 3 (маслонасос охлаждения):

Трехфазное металлическое КЗ - $I_{КЗ1} = 751$ А;

Однофазное дуговое КЗ - $I_{КЗ2} = 355$ А.

Номинальный ток расцепителя – 10 А,

Номинал автомата защиты – 16 А (один автоматический выключатель на группу из двух вентиляторов), характеристика срабатывания типа «С». В этом случае коэффициент чувствительности автомата:

$$K_{ч1} = \frac{751}{100} = 7,51 \text{ А}; K_{ч2} = \frac{355}{100} = 3,55 \text{ А}.$$

Коэффициент чувствительности в соответствии с требованием ПУЭ для автоматических выключателей с номинальным током менее 100 А - не менее 1,4.

Ток КЗ в точке 4 (вентилятор охлаждения):

Трехфазное металлическое КЗ $I_{КЗ1} = 741$ А;

Однофазное дуговое КЗ - $I_{КЗ2} = 354$ А;

Номинальный ток расцепителя – 10 А,

Номинал автомата защиты – 25 А (один автоматический выключатель на группу из двух вентиляторов), характеристика срабатывания типа «С». В этом случае коэффициент чувствительности автомата:

$$K_{ч1} = \frac{741}{100} = 7,41 \text{ А}; K_{ч2} = \frac{354}{100} = 3,54 \text{ А}.$$

Коэффициент чувствительности в соответствии с требованием ПУЭ для автоматических выключателей с номинальным током менее 100 А - не менее 1,4.

При возникновении КЗ на шинах двигателей вентиляторов и маслонасосов также срабатывает внутренняя защита от токов КЗ преобразователя частоты (ПЧ), что является дополнительной защитой в цепи питания привода.

Выводы по разделу 2.

Определен объем и назначение вновь прокладываемых сетей связи, выбрана марка кабелей и составлена структурная схема подключения датчиков. Определены основные требования к автоматизированному рабочему месту, располагающемуся в общеподстанционном poste управления и его интеграции в существующие системы автоматизированного управления.

«Для работы автоматической системы управления охлаждением трансформатора (АСУ ОТ) и регулирования частоты вращения двигателей вентиляторов и маслонасосов необходимо получать данные о текущей нагрузке трансформатора и температуре верхних слоев масла в виде цифровых или токовых сигналов.

Для получения данных о температуре верхних слоев масла будет произведена дополнительная установка накладных датчиков температуры с термоизоляцией от внешних воздействий» [15]. Сигнал pt100 от датчиков температуры будет поступать в аналоговый цифровой преобразователь для дальнейшей передачи в контроллер.

Данные о нагрузке автотрансформаторов АТ1 и АТ2 будут получены путем подключения к новым измерительным модулям по протоколу ModBus TCP.

Определен состав информации и основных видовых экранов, отображаемых на экране промышленной жидкокристаллической панели, расположенной на двери шкафа управления в контейнере. Через панель будут задаваться уставки и параметры работы системы и осуществляться визуальный контроль текущего состояния системы охлаждения трансформатора.

Выбраны алгоритмы работы систем охлаждения автотрансформаторов, произведен расчет тепловыделения и температуры верхних слоев масла в трансформаторах АТ1 и АТ2. Определены зависимости по которым будет происходить регулирование частоты вращения маслонасосов и вентиляторов и составлена блок-схема алгоритма.

Определен состав автоматизированной системы управления охлаждением и порядок переключения на существующий ШАОТ.

Определен состав необходимых мероприятий по обеспечению электромагнитной совместимости устройств.

Выполнен расчет токов КЗ. Расчет тока КЗ проводился для нескольких точек цепи питания самых удаленных приводов систем охлаждения с целью определения достаточности чувствительности выбранных автоматов защиты.

3 Оценка энергетической эффективности от реализации предлагаемых решений на подстанции

Расчет проводится для одной фазы трансформатора.

«Тепловыделение трансформатора приблизительно на 15% состоит из потерь холостого хода $Q_{\text{ХХ}}$ и на 85% из нагрузочных потерь $Q_{\text{КЗ}}$. Загрузочные потери пропорциональны квадрату тока и, соответственно, квадрату коэффициента загрузки k » [7]. Для систем охлаждения трансформатора удельным показателем расхода ресурсов будет являться отношение отведенной тепловой мощности к затраченной на это электроэнергии $\text{COP}_{\text{АТ-1}}$:

$$\text{COP}_{\text{АТГЗ}} = \frac{Q_{\text{тр}}}{P_{\text{СО}}} = \frac{Q_{\text{ХХ}} + Q_{\text{КЗ}} \cdot k^2}{P_{\text{СО}}} = \frac{0.15 + 0.85 \cdot k^2}{P_{\text{СО}}}, \quad (16)$$

где $Q_{\text{ХХ}}$ – потери холостого хода АТ1, АТ2 (105,107 кВт);

$Q_{\text{КЗ}}$ – потери короткого замыкания АТ1, АТ2 (485, 481 кВт);

$P_{\text{СО}}$ – мощность, потребляемая системой охлаждения, кВт;

k – коэффициент загрузки трансформатора.

Энергопотребление системы охлаждения $P_{\text{СО}}$ для текущих алгоритмов работы:

- ХХ - 16,4 кВт;
- при $T_{\text{всм}} 50^{\circ}\text{C}$ - 20,8 кВт;
- при $T_{\text{всм}} 50^{\circ}\text{C}$ и 40% - 37 кВт.

При частотном регулировании (согласно «Инструкциям по расчету экономической эффективности применения частотно-регулируемого электропривода» согласованным с Главгосэнергонадзором и утвержденной Минтеплоэнерго России от 19.12.1995г.).

«Соответственно тепловая мощность (тепловыделение) трансформатора равна» [32]:

$$Q = Q_{XX} + Q_{K3} \approx Q_{ном} \cdot [0,15 + 0,85 \cdot k^2]. \quad (17)$$

Тогда

$$Q / Q_{ном} = [0,15 + 0,85 \cdot k^2]. \quad (18)$$

«Для расчета принимается, что 4 охладителя обеспечивают номинальную тепловую мощность.

Тепловая мощность охлаждения линейно зависит от расхода (расхода масла для маслонасосов, расхода воздуха для вентиляторов)» [32]:

$$Q = G \cdot C_p \cdot \Delta T, \quad (19)$$

где «Q - тепловая мощность, кВт;

G – массовый расход, кг/с;

C_p – теплоемкость, кДж/(кг*К);

ΔT – изменение температуры, К» [32];

Тогда

$$G/G_{ном} = Q/Q_{ном} = [0,15 + 0,85 \cdot k^2] \quad (20)$$

«Формулы подобия для частотного регулирования насосов и вентиляторов» [32]:

$$\text{Расход } G = G_{ном} \cdot (n / n_{ном}); \quad (21)$$

$$\text{Напор } H = H_{ном} \cdot (n / n_{ном})^2; \quad (22)$$

«Электрическая мощность» [32]:

$$P = P_{ном} \cdot (n / n_{ном})^3, \quad (23)$$

$$\text{КПД } \eta \approx \eta_{ном}, \quad (24)$$

где «n - частота вращения» [32].

Тогда

$$P_{вент}/P_{вент.ном} = (G/G_{ном})^3 = [0.15 + 0.85 \cdot k^2]^3 \quad (25)$$

«Пример: при снижении расхода в 2 раза энергопотребление вентилятора падает в 8 раз.

Для насосов зависимость отличается – есть статический напор, поэтому к кубической зависимости добавляется коэффициент, учитывающий статическую составляющую. Для циркуляционных систем без разрыва потока этот коэффициент равен 0.1 - 0.2. Примем для расчетов 0.15» [32].

Тогда

$$P_{мн}/P_{мн.ном} = (G/G_{ном})^3 + 0.15 = 0.15 \cdot (1-k) + [0.15 + 0.85 \cdot k^2]^3 \quad (26)$$

Энергопотребление системы при частотном регулировании:

$$P_{чрп}(k) = P_{вент.ном} \cdot \frac{P_{вент}}{P_{вент.ном}} + P_{мн.ном} \cdot \frac{P_{мн}}{P_{мн.ном}}, \quad (27)$$

$$P_{чрп}(k) = 22 \cdot (0.15 + 0.85 \cdot k^2)^3 + 55 \cdot (0.15(1-k) + (0.15 + 0.85 \cdot k^2)^3)$$

$$\text{COP}_{чрп} = Q_{гр} / P_{чрп} \quad (28)$$

Сравнение $\text{COP}_{со}$ и $\text{COP}_{чрп}$ приведено на рисунке 20.

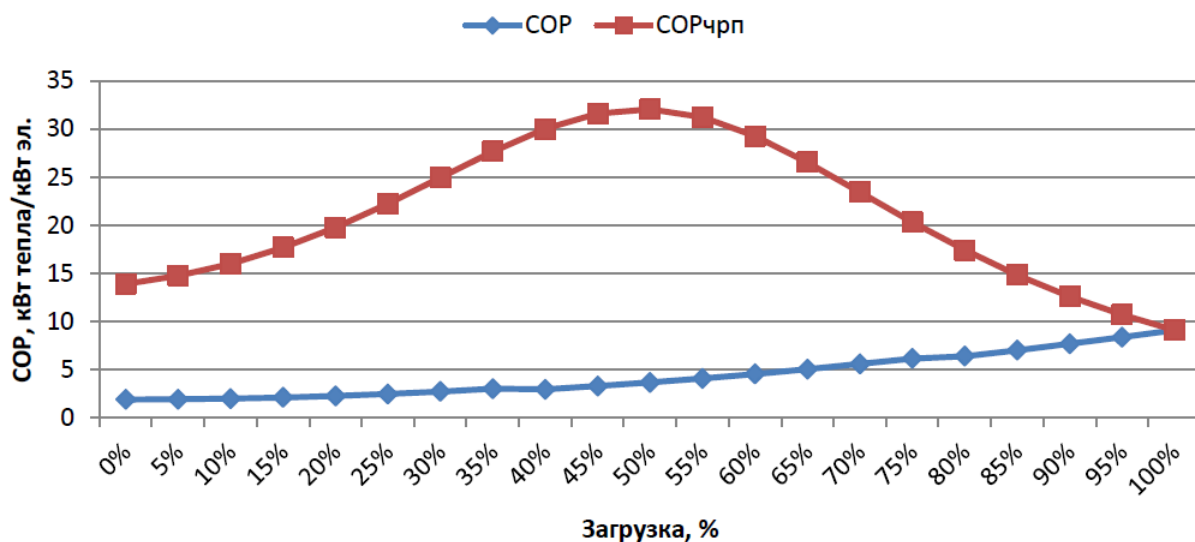


Рисунок 20 - Сравнение отводимой тепловой мощности на 1 кВт эл. мощности

Как видно из рисунка 20, для рабочих режимов трансформатора (загрузка 35-50%), $COP_{чрп}$ превышает $COP_{со}$ в 4-5 раз, следовательно, система частотного регулирования обеспечивает экономию 70-80% электроэнергии.

Расчет технологического эффекта АСУ ОТ производился в соответствии с Приказом №24 от 23.01.17 Об утверждении организационно-методической базы энергетического обследования ПАО «ФСК ЕЭС» п.1.3. При расчете экономического эффекта от внедрения АСУ ОТ применялся повышающий коэффициент, учитывающий расход ЭЭ на СН АСУ ОТ.

Результаты оценки экономического эффекта от внедрения описываемых технологий сведем в таблицу 10.

Расчет экономического эффекта АСУ ОТ производился в соответствии Приказ № 138 от 19.03.2015 Об утверждении Методических указаний по расчету экономического эффекта от реализации мероприятий по энергосбережению и повышению энергоэффективности на объектах ОАО «ФСК ЕЭС»

Таблица 10 - Оценка экономического эффекта от внедрения описываемых технологий

Год внедрения мероприятия	Срок полезного использования, лет	Физические объемы выполнения мероприятия		Капиталовложения, в ценах на момент внедрения мероприятия	Ожидаемый технологический эффект в год		
		Единица измерения (шт., кв.м., и т.д.)	Величина		Стоимость оборудования Итого тыс. руб.	Единица измерения (тыс. кВт·ч, Гкал, тыс. л., и т.д.)	1-й год
2023	20	шт	2,0	20 678	тыс. кВт·ч	238,13	238,13

Продолжение таблицы 10

Стоимость единицы энергии (тариф), тыс. руб./ед. энергии		Ставка дисконтирования (WACC), %	Ежегодный рост тарифа	ЧДД к концу срока полезного использования (NPV), тыс. руб.	Простой срок окупаемости, лет	Дисконтированный срок окупаемости, лет	Внутренняя норма доходности (IRR)
Ед. измерения (тыс. руб./ тыс. кВт*ч, и т.д.)	2020						
тыс. руб./тыс. кВт·ч	1,71503	7,3%	3%	17 298,644	8	9,4	21,1%

Выводы по разделу 3.

Произведена оценка энергетической эффективности от реализации предлагаемых решений на подстанции. Выполнен расчет отношения отведенной тепловой мощности к затраченной на это электроэнергии COP. Определено энергопотребление системы охлаждения P_{co} для текущих алгоритмов работы и при установке системы частотного регулирования, построены графики отводимой тепловой мощности на 1 кВт эл. мощности для обеих систем. Установлено, что для рабочих режимов трансформатора (загрузка 35-50%), $COP_{чрп}$ превышает COP_{co} в 4-5 раз, следовательно, система частотного регулирования обеспечивает экономию 70-80% электроэнергии.

Расчет экономического эффекта АСУ ОТ производился в соответствии с Приказом № 138 ОАО «ФСК ЕЭС». При итоговой стоимости оборудования в 20 678 тыс. руб. и планируемом сроке полезного использования в 20 лет, ЧДД к концу срока полезного использования составит 17 299 тыс. руб., а дисконтированный срок окупаемости 9,4 года.

Заключение

Оборудование ПС «Южная» включает в себя 8 однофазных и трехфазных автотрансформаторов общей мощностью 1502 МВА. «АТ1, АТ2 - трехфазные автотрансформаторы АДЦТН-250000/220/110 оснащены 6 охладителями, в составе каждого маслонасос мощностью 2,9 кВт и два вентилятора мощностью 2,2 кВт каждый, один из охладителей резервный» [3].

Результатом проведённого предварительного обследования, которое было выполнено на подстанции «Южная» были сформулированы первые выводы о возможности снижения расходов электроэнергии на собственные нужды охлаждения силовых трансформаторов, которых можно добиться путём установки автоматизированной системы управления охлаждением трансформатора и обеспечением соблюдения температуры наиболее нагретой точки у силового трансформатора в соответствии с действующими нормами.

Первоначально для дальнейшего исследования в работе был намечен вариант осуществления параллельной работы всех охладителей, кроме резервного, с регулированием скорости вращения охлаждающих трансформатор вентиляторов и подающих в систему масло насосов в зависимости от загрузки трансформаторов и температуры ННТ.

«Данное решение позволило значительно снизить потребляемую мощность и увеличить срок службы маслонасосов и вентиляторов, так как момент на валу электродвигателя маслонасоса и вентилятора пропорционален квадрату, а потребляемая мощность - кубу скорости вращения» [3].

Система охлаждения трансформатора снабжается частотными преобразователями следующим образом: один ПЧ для управления приводом маслонасоса и один ПЧ для управления парой вентиляторов охладителя.

Для установки шкафов управления охладителями трансформаторов предусматривается контейнер АСУ ОТ АТ1. Для автотрансформатора АТ1 предусматривается 8 шкафов управления, из которых 7 - с частотными преобразователями и один резервный, без ПЧ.

Питание контейнера АСУ ОТ АТ1 осуществляется от силовой сборки, устанавливаемой в щите собственных нужд. Предусматривается установка новых автоматических выключателей, выключателей-разъединителей в силовой сборке и прокладка кабелей питания контейнера. В качестве резервной системы управления охлаждением АТ1 используются существующие шкафы автоматического охлаждения трансформатора.

В здании ОПУ в помещении щита управления подстанцией организовано дополнительное автоматизированное рабочее место, которое будет оборудовано блоком визуализации с монитором и клавиатурой, контроллером для получения и обработки входящих сигналов (загрузка трансформатора от амперметров, данные о перегреве масла с существующих дискретных датчиков и т.д.).

Определен объем и назначение вновь прокладываемых сетей связи, выбрана марка кабелей и составлена структурная схема подключения датчиков. Определены основные требования к автоматизированному рабочему месту, располагающемуся в общеподстанционном poste управления и его интеграции в существующие системы автоматизированного управления.

«Для работы автоматической системы управления охлаждением трансформатора (АСУ ОТ) и регулирования частоты вращения двигателей вентиляторов и маслонасосов необходимо получать данные о текущей загрузке трансформатора и температуре верхних слоев масла в виде цифровых или токовых сигналов.

Для получения данных о температуре верхних слоев масла будет произведена дополнительная установка накладных датчиков температуры с термоизоляцией от внешних воздействий» [15]. Сигнал pt100 от датчиков температуры будет поступать в аналоговый цифровой преобразователь для дальнейшей передачи в контроллер.

Данные о загрузке автотрансформаторов АТ1 и АТ2 будут получены путем подключения к новым измерительным модулям по протоколу ModBus TCP. Определен состав информации и основных видовых экранов,

отображаемых на экране промышленной жидкокристаллической панели, расположенной на двери шкафа управления в контейнере. Через панель будут задаваться уставки и параметры работы системы и осуществляться визуальный контроль текущего состояния системы охлаждения трансформатора.

Выбраны алгоритмы работы систем охлаждения автотрансформаторов, произведен расчет тепловыделения и температуры верхних слоев масла в трансформаторах АТ1 и АТ2. Определены зависимости по которым будет происходить регулирование частоты вращения маслонасосов и вентиляторов и составлена блок-схема алгоритма. Определен состав автоматизированной системы управления охлаждением и порядок переключения на существующий ШАОТ. Определен состав необходимых мероприятий по обеспечению электромагнитной совместимости устройств.

Выполнен расчет токов КЗ. Расчет тока КЗ проводился для нескольких точек цепи питания самых удаленных приводов систем охлаждения с целью определения достаточности чувствительности выбранных автоматов защиты.

Произведена оценка энергетической эффективности от реализации предлагаемых решений на подстанции. Выполнен расчет отношения отведенной тепловой мощности к затраченной на это электроэнергии COP . Определено энергопотребление системы охлаждения P_{co} для текущих алгоритмов работы и при установке системы частотного регулирования, построены графики отводимой тепловой мощности на 1 кВт эл. мощности для обеих систем. Установлено, что для рабочих режимов трансформатора (загрузка 35-50%), $COP_{чрп}$ превышает COP_{co} в 4-5 раз, следовательно, система частотного регулирования обеспечивает экономию 70-80% электроэнергии.

Расчет экономического эффекта АСУ ОТ производился в соответствии с Приказом № 138 ОАО «ФСК ЕЭС». При итоговой стоимости оборудования в 20 678 тыс. руб. и планируемом сроке полезного использования в 20 лет, ЧДД к концу срока полезного использования составит 17 299 тыс. руб., а дисконтированный срок окупаемости 9,4 года.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Айзенфельд А. И. Показатели работы устройств релейной защиты и автоматики в энергосистемах. Электрические станции. 2003. № 1. С.48-52.
2. Белоусенко И. В., Голубев С. В., Дильман М. Д. Исследование и технико-экономическая оценка надежности электроснабжения электростанций собственных нужд. Промышленная энергетика. 2002. №11. С. 62-64.
3. Белоусенко И. В., Горюпов О. А. Моделирование надежности систем электроснабжения с применением автономных источников и эффективность их применения. Промышленная энергетика. 2009. №6. С. 12-26.
4. Беляев А. В. Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ. М.: Энергоатомиздат. 2008. 172с.
5. Биллингтон Р., Аллан Р. Оценка надежности электроэнергетических систем. М.: Энергоатомиздат. 2008. 288с.
6. Борухман В. А., Кулдыкин А. Н. Определение места повреждения изоляции в сети оперативного постоянного тока. Электрические станции. 2002. № 7. С. 58-60.
7. Буль Б. К. Основы теории электрических аппаратов. М.: Высшая школа. 2000. 600 с.
8. Васильев А. А. Электрическая часть станций и подстанций. М.: Энергия. 2000. 608 с.
9. Гинзбург С. Г. Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях. М.: Высшая школа. 2007. 388 с.
10. Голубев М. А. Защита вторичных цепей от коротких замыканий. Библиотека электромонтера. Вып.548. М.: Энергоиздат. 2002. 80 с.
11. ГОСТ 10434-82 Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования (с Изменением N 1,2,3).

12. ГОСТ 23792-79 Соединения контактные электрические сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.
13. ГОСТ Р 50571.4.44-2019 (МЭК 60364-4-44:2007) Электроустановки низковольтные. Часть 4.44. Защита для обеспечения безопасности. Защита от резких отклонений напряжения и электромагнитных возмущений.
14. ГОСТ Р 51317.6.5-2006 (МЭК 61000-6-5-2001) Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых на электрических станциях и подстанциях. Технические требования и методы испытаний.
15. Гук Ю.Б. Анализ надёжности электроэнергетических установок. Д.: Энергоатомиздат. 2008. 224 с.
16. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М.: Энергия. 1975. 483 с.
17. Правила устройства электроустановок. Минэнерго СССР.- 6-е изд. Переработанное и дополненное. М.: Энергоатомиздат, 1985. 640 с.
18. Правила устройства электроустановок. Раздел 1. Общие правила. Главы 1.1, 1.2, 1.7, 1.9. Раздел 7. Электрооборудование специальных установок. Главы 7.5, 7.6, 7,10. 7-е изд. М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2002. 194 с.
19. РД 153-34.0-20.525-00 Методические указания по контролю заземляющих устройств электроустановок. М.: СПО ОРГРЭС, 2000.
20. Рудняков А. В. Оптимизация работы электроприводов систем охлаждения мощных трансформаторов. М.: Высшая школа. 2001. 232 с.
21. СНиП 2.01.01-82 Строительная климатология. 01.01.2000.
22. СО 34.35.311-2004 Методические указания по определению электромагнитных обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях. М.: Издательство МЭИ, 2004.

23. СО-153-34.21.122-2003 Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. Москва. Издательство МЭИ, 2004г.

24. СТО 56947007-29.120.70.241-2017 Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА. Стандарт организации.

25. СТО 56947007-29.130.15.105-2011 Методические указания по контролю заземляющих устройств электроустановок. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС».

26. СТО 56947007-29.240.40.263-2018. Системы собственных нужд подстанций. Типовые проектные решения.

27. СТО-56947007-29.130.15.114-2012 Руководящие указания по проектированию заземляющих устройств подстанций напряжением 6-750 кВ.

28. СТО-56947007-29.240.043-2010 Руководство по обеспечению электромагнитной совместимости вторичного оборудования и систем связи электросетевых объектов, Стандарт организации.

29. СТО-56947007-29.240.044-2010 Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства.

30. ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ. Определение электромагнитной обстановки, разработка рекомендаций по обеспечению ЭМС аппаратуры РЗА, АСУ, АСКУЭ и связи относящейся к расширению ОРУ 500 кВ Волгодонской АЭС. Обследование электромагнитной обстановки, разработка рекомендаций по обеспечению ЭМС аппаратуры РЗА и её вторичных цепей, устанавливаемой по проекту расширения ОРУ 500 кВ Волгодонской АЭС на смежных ПС (обратных концах). ООО «ЭЗОП», 2008г.

31. Технический циркуляр №11/2006 «О заземляющих электродах и заземляющих проводниках». Дополнение к ПУЭ 7-го издания. Москва 2006.

32. Шакарян Ю.Г. Инструкция по расчету экономической эффективности применения частотно-регулируемого электропривода, АО ВНИИЭ, МЭИ, М. 1997 г.

33. Шкурдода А.С., Липанов Д.С., Николаев К.Б., Черненко А.Н. Автоматическая система управления охлаждением трансформатора // Эффективное управление инновационными процессами в условиях цифровой трансформации: сборник статей Международной научно-практической конференции (5 апреля 2023 г., г. Ижевск). - Уфа: Аэтерна, 2023. С. 36-38.
34. Abbas A.J., Gaeid K.S., Salih I.K. Modeling and Control of the Saturation's Transformer // Tikrit Journal of Engineering Science. 2013. Vol 17. No 1. PP. 16-27.
35. Brando G., Cervone A., Del Pizzo A., Dannier A., Bova B. A Distribution Power Electronic Transformer with MMC // Applied Sciences. 2018 PP. 1-12.
36. Chraygane M., El Ghazal N. Improved modeling of new three-phase high voltage transformer with magnetic shunts // Archives of Electrical Engineering. 2015. Volume 64. Issue 1. PP. 157-172.
37. Sarhan M.A., Lotfi T., Hamilton D.C. A New Lifetime Distribution and Its Power Transformation // Journal of Probability and Statistics. 2014 Volume 2014. Article ID 532024. PP. 1-14.
38. Sen P.K. Understanding Direct Lightning Stroke Shielding of Substations / PSERC Seminar Golden, Colorado November 6, 2001.
39. Zamboti M., Fortes M.Z., Fernandes H.S., Moura M.B., Guadelupe P., Fernandes N.C. Software to manage transformers using intelligent electronic device // Ingenieria e Investigacion. 2016. V 36. N 1. PP. 85-89.