

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

Институт машиностроения  
(наименование института полностью)

Кафедра «Промышленная электроника»  
(наименование)

11.03.04 Электроника и наноэлектроника  
(код и наименование направления подготовки / специальности)

Промышленная электроника  
(направленность (профиль) / специализация)

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

Автоматизированная СД система охлаждения силового  
на тему \_\_\_\_\_ трансформатора \_\_\_\_\_

Обучающийся

М.Б. Миночетдинов

(Инициалы Фамилия)

\_\_\_\_\_ (личная подпись)

Руководитель

А.В. Прядилов

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

Тольятти 2025

## Аннотация

Тема данной выпускной квалификационной работы “Автоматизированная СД система охлаждения силового трансформатора”.

Представленная работа состоит из пояснительной записки на 80 страницах, включающей в себя 75 рисунков, 2 таблицы, 2 приложения, список литературы из 20 источников, 7 из которых на иностранном языке и графическую часть на 9 листах формата А1.

Целью выполнения данной выпускной квалификационной работы является повышение срока безаварийной и бесперебойной работы силовых трансформаторов, а также конечное повышение качества поставляемой электроэнергии, по средствам разработки автоматизированной СД системы охлаждения силового трансформатора.

В первой части работы была поставлена основная концепция, цель выполнения проекта и список задач, которые необходимо решить в ходе работы. Были изучены основные положения касательно силовых трансформаторов, их классификации, назначении и различиях. Была изучена информация о специфике работы и классификации систем охлаждения.

Во второй части работы была разработана структура автоматизированной СД системы охлаждения силового трансформатора, проведен подбор и настройка компонентов системы управления и приводной системы. Разработаны и реализованы необходимые программные связи и алгоритмы управления.

В третьей части работы был представлен обобщенный алгоритм работы автоматизированной СД системы охлаждения силового трансформатора, а также представлены некоторые разработанные функциональные экраны НМІ.

Результатом выполнения данной работы является готовый программно-аппаратный комплекс для реализации СД системы охлаждения силовых трансформаторов.

## **Abstract**

The topic of this graduate qualification work is “Automated SD cooling system of power transformer”.

The presented work consists of an explanatory note on 80 pages, including 75 figures, 2 tables, 2 annexes, a list of literature from 20 sources, 7 of which are in a foreign language and a graphical part on 9 sheets of A1 format.

The purpose of this graduate qualification work is to increase the period of trouble-free and uninterrupted operation of power transformers, as well as the final increase in the quality of electricity supplied, by developing an automated SD cooling system of power transformer.

In the first part of the work, the basic concept, the purpose of the project and the list of tasks to be accomplished in the course of the work were set. The main points about power transformers, their classification, purpose and differences were studied. The information about the specifics of operation and classification of cooling systems was studied.

In the second part of the work, the structure of the automated SD system of power transformer cooling was developed, the selection and tuning of the components of the control system and the drive system were carried out. Necessary program connections and control algorithms were developed and implemented.

In the third part of the paper, the generalized algorithm of the automated SD of power transformer cooling system was presented, and some developed HMI function screens were presented.

The result of this work is a finished hardware-software complex for realization of SD system of cooling of power transformers.

## Содержание

Введение .....	5
1 Состояние вопроса .....	7
1.1 Трансформатор как электромагнитное устройство .....	7
1.2 Системы охлаждения и периферийного контроля.....	14
1.3 Анализ данных по проекту и определение основной концепции.	21
2 Разработка автоматизированной системы охлаждения .....	26
2.1 Выбор установки и расчет технологических параметров.....	26
2.2 Приводная часть .....	35
2.3 Автоматизация системы.....	52
3 Разработка функциональных экранов НМІ.....	72
Заключение .....	78
Список используемой литературы.....	79
Приложение А Перечень элементов к схеме электрической принципиальной СД системы охлаждения .....	81
Приложение Б Листинг участка управляющей PLC программы .....	82

## Введение

В современном мире сложно представить функционирование любого предприятия, жилого или производственного помещения, оборудования, да и человека в целом без наличия электроэнергии. Одним из ключевых звеньев в цепи поставки качественной электроэнергии до конечного пользователя являются распределительные подстанции и силовые трансформаторы, входящие в их состав.

Силовым трансформатором является электротехническое устройство с двумя или более обмотками, входящее в состав сетей электроснабжения и преобразующее величину переменного тока и напряжения в необходимую, по средствам электромагнитной индукции. Также силовым трансформатором называют понижающий трансформатор, входящий в состав вторичных источников электроснабжения различных устройств и аппаратуры, обеспечивающий их питание от бытовой электросети.

Состояние силового трансформатора, его бесперебойная работа и исправность всех систем напрямую влияет на качество конечной сети, к которой он подключен. Одним из распространенных факторов, влияющих на стабильную работу силового трансформатора, является перегрев.

Перегрев силовых трансформаторов опасен тем, что способен приводить к разрушению изоляционного материала, снижению КПД силовой установки и возможному выходу из строя всего оборудования. К причинам, приводящим силовую установку к перегреву, можно отнести:

- длительная работа установки под нагрузкой, превышающей номинальную, что приводит к увеличению тепловых потерь и общему перегреву установки;
- короткие замыкания и скачки напряжения;
- неисправности системы охлаждения;
- неблагоприятное воздействие внешних факторов.

Исходя из вышеперечисленного, можно сделать вывод, что современные трансформаторы должны быть оборудованы автоматическими системами, реагирующими на превышение установленной температуры и предотвращающими перегрев. Тип охлаждения силового трансформатора определяется его номинальными характеристиками и конструктивными особенностями.

Целью выполнения данной выпускной квалификационной работы является повышение срока безаварийной и бесперебойной работы силовых трансформаторов а также конечное повышение качества поставляемой электроэнергии, по средствам разработки автоматизированной СД системы охлаждения силового трансформатора с возможностью ее функционирования как отдельной системы и предусматривая внедрение и использование ее основных алгоритмов и технических решений как средство модернизации существующих ДЦ систем охлаждения силовых трансформаторов.

# 1 Состояние вопроса

## 1.1 Трансформатор как электромагнитное устройство

В обобщенном виде трансформатор представляет собой статическое электромагнитное устройство, имеющее в своем составе две или более обмотки, связанные индуктивно, на каком-либо магнитопроводе и необходимые для процесса преобразования напряжения переменного тока из одного диапазона в другой с сохранением частоты по средствам электромагнитной индукции.

Электромагнитной индукцией называется процесс возникновения электрического тока или электрического поля при изменении магнитного поля во времени или при движении материальной среды в магнитном поле, как показано на рисунке 1.

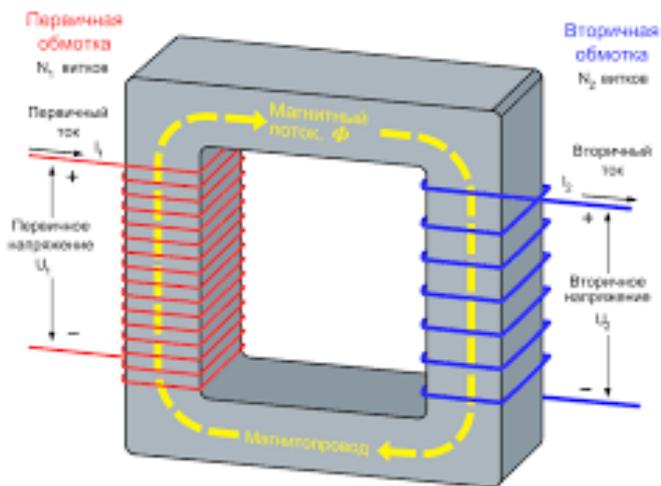


Рисунок 1 – Электромагнитная индукция в трансформаторе

Рассмотрим принцип работы трансформатора на простейшем случае. В простейшем случае трансформатор имеет две обмотки, на первичную обмотку подается переменный ток, а со вторичной обмотки преобразованная система переменного тока снимается для дальнейшего использования. Ток,

протекающий в первичной обмотке, образует магнитное поле, поток которого изменяет свою величину и направление аналогично изменению и направлению тока в первичной обмотке. К примеру, в стандартах нашей страны ток и напряжение электросети изменяются по синусоидальному закону с частотой 50 Гц, возникающий магнитный поток замыкается в сердечнике трансформатора и пронизывает витки вторичной обмотки, тем самым наводя в каждой витке вторичной обмотки ЭДС, величина которой прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока и количеству витков, которых он пронизывает. На рисунке 2 представлена простейшая модель трансформатора.

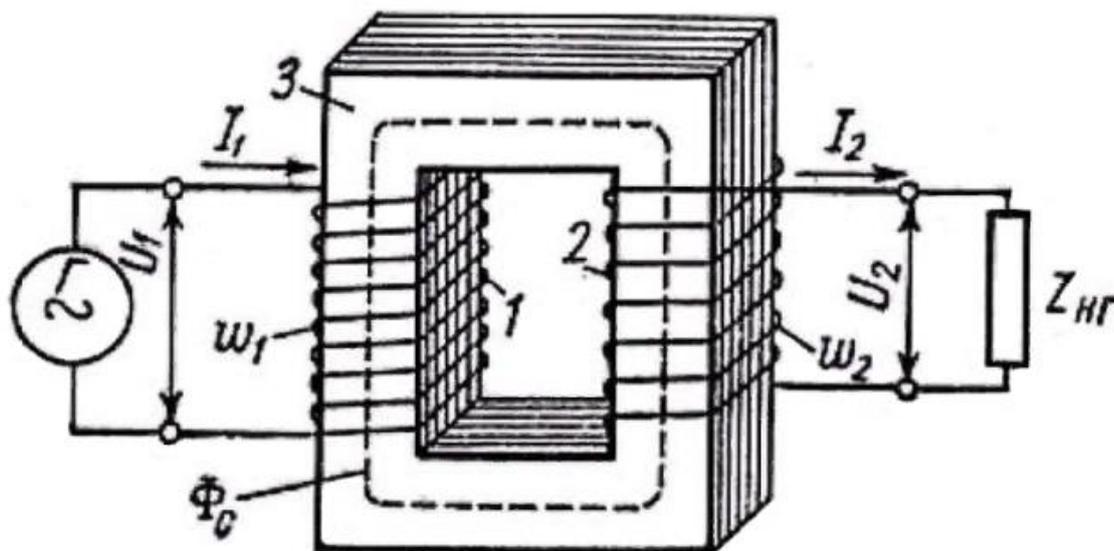


Рисунок 2 – Простейшая модель трансформатора

Конструктивно трансформатор может состоять из одной (автотрансформатор) или нескольких изолированных проволочных или ленточных обмоток, охватываемых магнитным потоком.

Помимо стандартной функции преобразования напряжения и тока трансформатор может выполнять функцию гальванической развязки, что

также активно применяется в различных областях электроники, электротехники и радиотехнике.

На рисунке 3 представлена общепринятая классификация трансформаторов в зависимости от конструктивных особенностей.



Рисунок 3 – Классификация трансформаторов

Силовым же трансформатором является электротехническое устройство с двумя или более обмотками, входящее в состав сетей электроснабжения и преобразующее величину переменного тока и напряжения в необходимую, по средствам электромагнитной индукции. Также силовым трансформатором называют понижающий трансформатор, входящий в состав вторичных источников электроснабжения различных устройств и аппаратуры, обеспечивающий их питание от бытовой электросети. На рисунке 4 представлен силовой трансформатор подстанции 110 кВ.



Рисунок 4 – Силовой трансформатор 110 кВ

Обмотки силового трансформатора производятся из меди или алюминия. Каждый из витков, входящих в состав обмотки трансформатора, изолирован как от магнитопровода, так и от других витков в обмотке. Между основными функциональными элементами трансформатора предусмотрено специальное пространство для циркуляции охлаждающей жидкости (для масляных и жидкостных трансформаторов) и отвода выделяемого тепла от магнитопровода и обмоток.

Для подключения обмоток высокого, среднего и низкого напряжения силового трансформатора к необходимым устройствам, подключаемым к электрической сети, например, генераторам, двигателям, линиям электропередач, на трансформаторах устанавливаются выводы различного типа и конструкции. К примеру, выводы на стороне высокого напряжения имеют высокое номинальное напряжение, а на стороне низкого напряжения высокие номинальные токи, что сказывается на их габаритных размерах и конструкции. Для обеспечения функции регулирования напряжения и тока на первичной обмотке силового трансформатора, за счет изменения коэффициента трансформации путем электрического соединения разного

числа обмоток, могут быть установлены переключатели двух типов, один производит переключение под нагрузкой, а другой без (переключение без возбуждения).

Помимо рассмотренной выше классификации трансформаторы различаются и по типу среды, в которую помещается магнитопровод и обмотки силового трансформатора. В таблице 1 представлена сравнительная характеристика сухих и масляных трансформаторов.

Таблица 1 – Сравнение сухих и масляных трансформаторов

Характеристика	Маслонаполненные	Сухие
Установка и эксплуатация	Наружная, обязательное наличие масла хозяйства, большая протяжённость кабельных линий	Внутренняя и внешняя, короткий кабельные линии
Категория пожарной взрывобезопасности	В1-пожароопасная 1	Д-безопасная 2
Охлаждение	Воздух (-40°с... + 60° С)	Воздух (-60°с... + 60° С)
Перегрузка	Длительное время незначительной перегрузки	Большая перегрузочная способность непродолжительное время
Обслуживание	Ежегодная проверка масла на наличие воды и газа	Очистка от пыли, обследования соединения тепловизором и визуальный осмотр
Выбросы CO <sub>2</sub>	Есть	Отсутствует
Потери	Большие потери на короткое замыкание	Низкие потери КЗ снижение потерь на тока XX и КЗ

Более подробно продолжим рассмотрение конструкции узлов и функционирования на примере сухого трансформатора, как более подходящего под тему выполняемой выпускной квалификационной работы.

На рисунках 5 и 6 представлено строение силового трансформатора на примере трансформатора сухого типа.

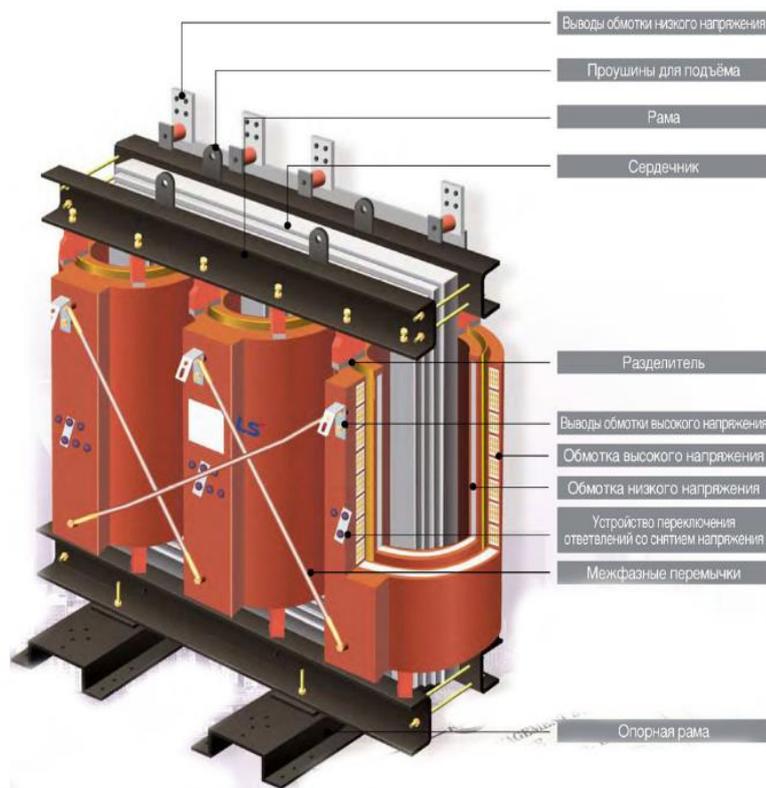


Рисунок 5 – Основные элементы конструкции сухого трансформатора



Рисунок 6 – Экономическая выгода использования сухого трансформатора

Однако очевидно, что несмотря на некоторые преимущества использования сухих трансформаторов невозможно исключить из использования трансформаторы масляного типа, ввиду разного их функционального назначения, рабочих параметров и номинальных мощностей.

“Недостатки использования сухих трансформаторов, к примеру, связаны со сравнительно большими габаритными размерами. Для мощных машин возникает необходимость значительного увеличения объема корпуса с целью увеличить воздушный зазор для охлаждения, помимо того, применение литой изоляции несет в себе опасность механического разрушения при эксплуатации в условиях пониженных температур или резких температурных скачков” [4].

Сухие трансформаторы активно применяются в бытовой и производственной сфере, к примеру, в тяговых и трансформаторных подстанциях, приводах наземного транспорта и что особенно актуально – электроснабжении производственных цехов. К основным преимуществам сухих трансформаторов можно отнести:

- экологическая безопасность;
- простота обслуживания и эксплуатации;
- безопасность в ходе эксплуатации;
- относительная простота конструкции и исполнения;
- относительно небольшие габариты и вес;
- удобство транспортировки.

## 1.2 Системы охлаждения и периферийного контроля

Состояние силового трансформатора, его бесперебойная работа и исправность всех систем напрямую влияет на качество конечной сети, к которой он подключен. Одним из распространенных факторов, влияющих на стабильную работу силового трансформатора, является перегрев [10].

Перегрев силовых трансформаторов опасен тем, что способен приводить к разрушению изоляционного материала, снижению КПД силовой установки и возможному выходу из строя всего оборудования. К причинам, приводящим силовую установку к перегреву, можно отнести:

- длительная работа установки под нагрузкой, превышающей номинальную, что приводит к увеличению тепловых потерь и общему перегреву установки;
- короткие замыкания и скачки напряжения;
- неисправности системы охлаждения;
- неблагоприятное воздействие внешних факторов.

Исходя из вышеперечисленного, можно сделать вывод, что современные трансформаторы должны быть оборудованы автоматическими системами, реагирующими на превышение установленной температуры и предотвращающими перегрев. Тип охлаждения силового трансформатора определяется его номинальными характеристиками и конструктивными особенностями [12].

Как было рассмотрено выше, трансформаторы различают по количеству фаз, типу изоляции, числу обмоток. Помимо того, один из распространенных типов классификации основывается на системе охлаждения, зависящей от того, в какую среду погружается магнитная система трансформатора (сердечник):

- масляные – сердечник погружен в трансформаторное масло, обладающее диэлектрическими свойствами;
- сухие – в качестве охлаждающей среды используется эпоксидная смола, заливаемая в обмотки;

- жидкостные – В качестве охлаждающей среды используются органические жидкости (негорючие диэлектрики).

В таблице 2 представлена сводная классификация силовых трансформаторов по виду и типу охлаждения.

Таблица 2 – Сводная классификация трансформаторов

Вид трансформатора	Тип охлаждения	Обозначения
Сухие	Естественное воздушное-для открытого исполнения	С
	Аналогично-для защитного исполнения	СЗ
	Аналогично-для герметичного исполнения	СГ
	Воздушная дутьём	СД
Масляные	Естественная циркуляция воздуха и масла	М
	Два вида циркуляции-принудительная для воздуха и естественная для масла	Д
	Два вида циркуляции -естественная для воздуха и принудительная для масла	МЦ
	Принудительная циркуляция воздуха и масла	ДЦ
	Два вида циркуляции принудительная для воды и естественная для масла	МВ
	Принудительная циркуляция воды и масла	Ц
Жидкостные	Естественное охлаждение негорючей жидкий диэлектрик	Н
	Охлаждение негорючим жидким диэлектриком посредством дутья	НД

Воздушное (естественное) охлаждение силового трансформатора обеспечивается путем естественной конвекции воздуха и излучения в окружающую среду, за счет чего и происходит охлаждение трансформатора. Данный тип охлаждения используется только в сухих трансформаторах.

Для сухих трансформаторов превышение температуры обмотки по сравнению с температурой окружающей среды зависит от присвоенного класса нагревостойкости изоляции, что прописано в ГОСТ11677-85:

- класс А имеет приращение температуры не более 60 °С;
- класс Е имеет приращение температуры не более 75 °С;
- класс В имеет приращение температуры не более 80 °С;
- класс F имеет приращение температуры не более 100 °С;
- класс Н имеет приращение температуры не более 125 °С.

Воздушные системы относительно малоэффективны, поэтому как правило применяются для трансформаторов мощностью до 1600 кВ А при напряжении до 15 кВ [2].

Более совершенной системой воздушного охлаждения силового трансформатора является воздушное охлаждение с принудительным обдувом за счет установки на защитный корпус или кожух вентиляторов охлаждения, как показано на рисунке 7.

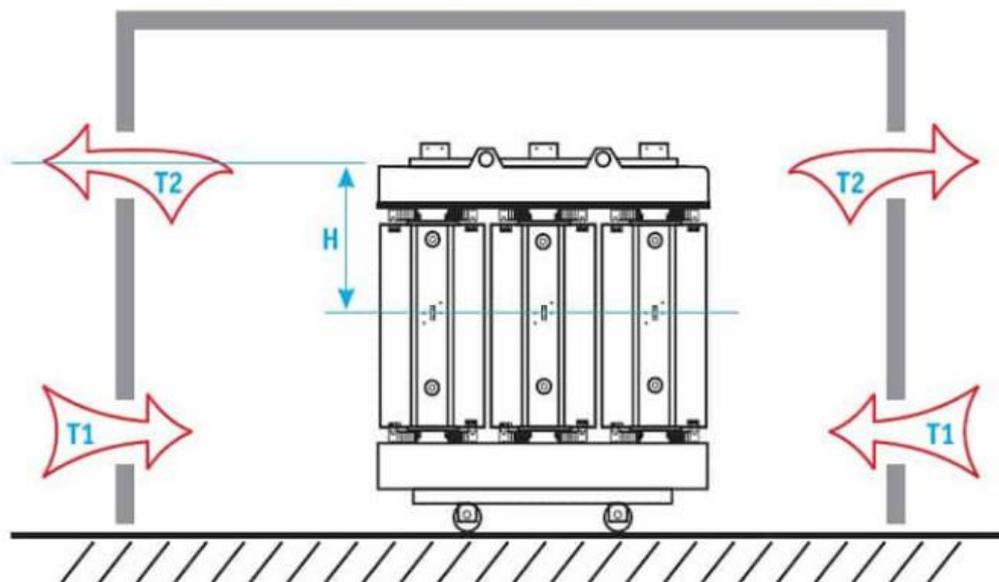
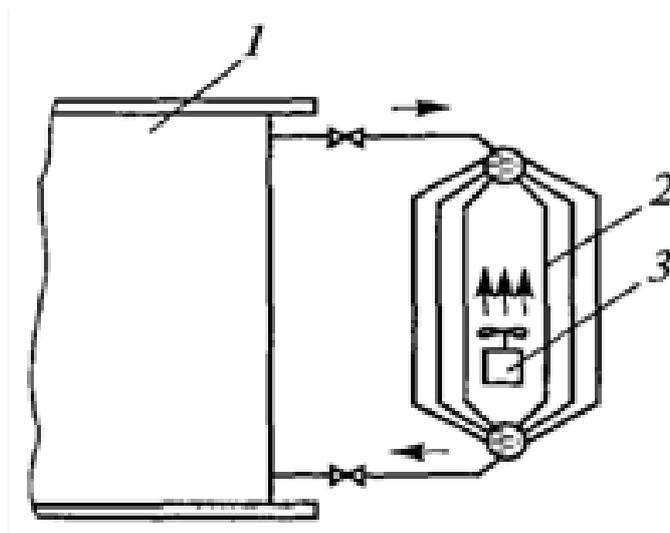


Рисунок 7 – Пример функционирования СД системы охлаждения

“Следующим из видов естественного охлаждения является масляное, которое выполняется для силовых трансформаторов мощностью до 16000 Кв\*А. В трансформаторах с масляным охлаждением тепло, выделяемое в обмотках и магнитопроводе, передается трансформаторному маслу, которое циркулирует по контуру охлаждения, состоящему из бака, масляной трассы и радиатора. Для масла, в свою очередь, происходит теплообмен с окружающей средой. Данный алгоритм справедлив для работы силового трансформатора в штатном режиме при номинальной нагрузке, указанной в правилах технической эксплуатации. Для обеспечения наилучшей отдачи тепла в окружающую среду при естественном масляном охлаждении бак силового трансформатора снабжают ребрами, радиаторами и специализированными охлаждающими трубками” [6].

“Более эффективной системой охлаждения мощных масляных трансформаторов является система охлаждения с принудительной циркуляцией воздуха и естественной циркуляцией масла. При реализации данной системы охлаждения на навесные охлаждающие элементы и радиаторы помещают вентиляторы охлаждения. Вентилятор в цикле своей работы засасывает холодный воздух снизу и обдувает нагретую верхнюю часть труб радиатора охлаждения силового трансформатора. Важно отметить, что пуск и останов вентиляторов охлаждения должен являться динамической системой и реагировать на изменение температуры нагретого масла в трубах охладителях. Трансформаторы с таким типом охлаждения способны функционировать с полностью отключенной системой принудительной циркуляции воздуха при условии, что нагрузка силового трансформатора не превышает 100% от номинальной, а температура верхних слоев естественного циркулирующего масла не превышает 55 °С, кроме того, общая температура масла, вне зависимости от условий окружающей среды не должна превышать 45 °С, что прописано в ПТЭ” [7].

“Максимально допустимая температура верхних слоев масла, при номинальной работе трансформатора составляет 95 °С. Наличие принудительного обдува радиаторных труб значительно повышает эффективность охлаждения масла, а следовательно, быстрее снижает температуру магнитопровода и обмоток, что позволяет производить масляные трансформаторы с таким типом охлаждения мощностью до 80000 кВ\*А. На рисунке 8 представлена схема системы охлаждения силового трансформатора с дутьем и естественной циркуляцией масла” [4,5,12].



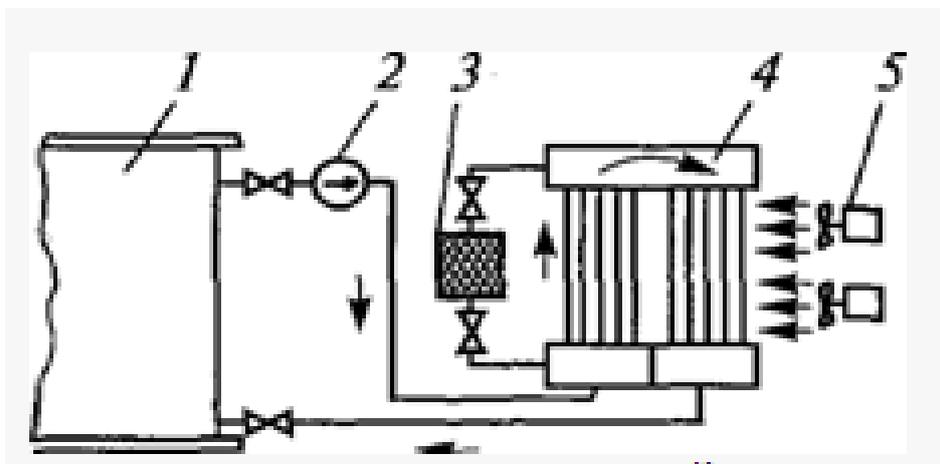
1 – бак трансформатора; 2 – радиаторы охлаждения; 3 – вентиляторы обдува.

Рисунок 8 – Схема системы охлаждения силового трансформатора с дутьем и естественной циркуляцией масла

“Другая вариация системы охлаждения масляного трансформатора с принудительной циркуляцией масла и воздуха применяется для трансформаторов мощностью до 63000 кВ\*А. Охладители в данной системе состоят из ребристых трубок, обдуваемых потоками воздуха от вентиляторов охлаждения, а электронасосы, встроенные в контур циркуляции масла, создают непрерывный поток трансформаторного масла через охладители. Ввиду достаточно высокой скорости циркуляции масла и большой поверхности охладителя, а также интенсивной циркуляции воздуха, данные

системы охлаждения обладают большой теплоотдачей и относительной компактностью, что позволяет значительно уменьшить габаритные размеры трансформатора” [13].

Конструктивно охладители могут устанавливаться в одном корпусе с трансформатором или на отдельных площадках рядом с баком трансформатора. На рисунке 9 представлена схема системы охлаждения силового трансформатора с дутьем и принудительной циркуляцией масла.



1 — бак трансформатора; 2 — масляный электронасос; 3 — адсорбционный фильтр; 4 — охладитель; 5 — вентилятор обдува

Рисунок 9 – Схема системы охлаждения силового трансформатора с дутьем и принудительной циркуляцией масла

Помимо основной системы охлаждения силовые трансформаторы могут быть оснащены дополнительным навесным оборудованием и контролирующими системами, например, системой аварийного отключения. На рисунке 10 представлены примеры навесного оборудования и систем контроля для силового трансформатора.



Рисунок 10 – Навесное оборудование и системы контроля на силовом трансформаторе

В качестве защитного элемента, отключающего трансформатор или подающего оповещающие сигналы, может выступать газовое реле. Принцип действия данного устройства в целях защиты трансформатора основан на контроле давления газа. Реле врезают в маслопровод трансформатора между баком и расширителем, при резком повышении температуры, к примеру, при возникновении электрического разряда внутри бака трансформатора начинается процесс разложения масла, из-за чего в баке и образуется газ. Разогретый газ стремится попасть в расширительный бак устройства, тем самым проходя через корпус защитного реле, контролирующего данный процесс [8].

### **1.3 Анализ данных по проекту и определение основной концепции**

На данном этапе выполнения выпускной квалификационной работы должна быть определена основная концепция проектируемой автоматизированной системы охлаждения силового трансформатора СД типа, имеющей возможность функционировать в составе ДЦ системы охлаждения масляных силовых трансформаторов. Помимо того, при работе в рамках данного этапа была выполнена первичная проработка технического решения по реализации аппаратной и программной части системы охлаждения и системы диспетчеризации [5].

СД система охлаждения силового трансформатора применяется для таких силовых установок, где отсутствует масло, а следовательно, и контур его циркуляции и охлаждения. Такие аппараты устанавливаются в тех жилых и промышленных помещениях, где использование масляных образцов запрещено из-за горючести охладителя.

В случае использования масляных силовых трансформаторов, разрабатываемая система должна иметь возможность интегрирования в ДЦ систему охлаждения силового трансформатора с условием заранее реализованного контура принудительной циркуляции масла, так как в рамках выполнения выпускной квалификационной работы данный вопрос не будет подлежать рассмотрению.

Разрабатываемая автоматизированная СД система охлаждения силового трансформатора должна обеспечивать активный контроль и мониторинг температуры внутри защитного кожуха (корпуса) сухого трансформатора и динамически регулировать частоту вращения вентиляторов охлаждения, в зависимости от выбранной уставки соотношения температур. Помимо того, система управления должна быть готова к передаче всей необходимой информации на более высокий уровень для дальнейшего контроля и мониторинга. На рисунке 11 представлена упрощенная структурная схема разрабатываемой системы охлаждения силового трансформатора.

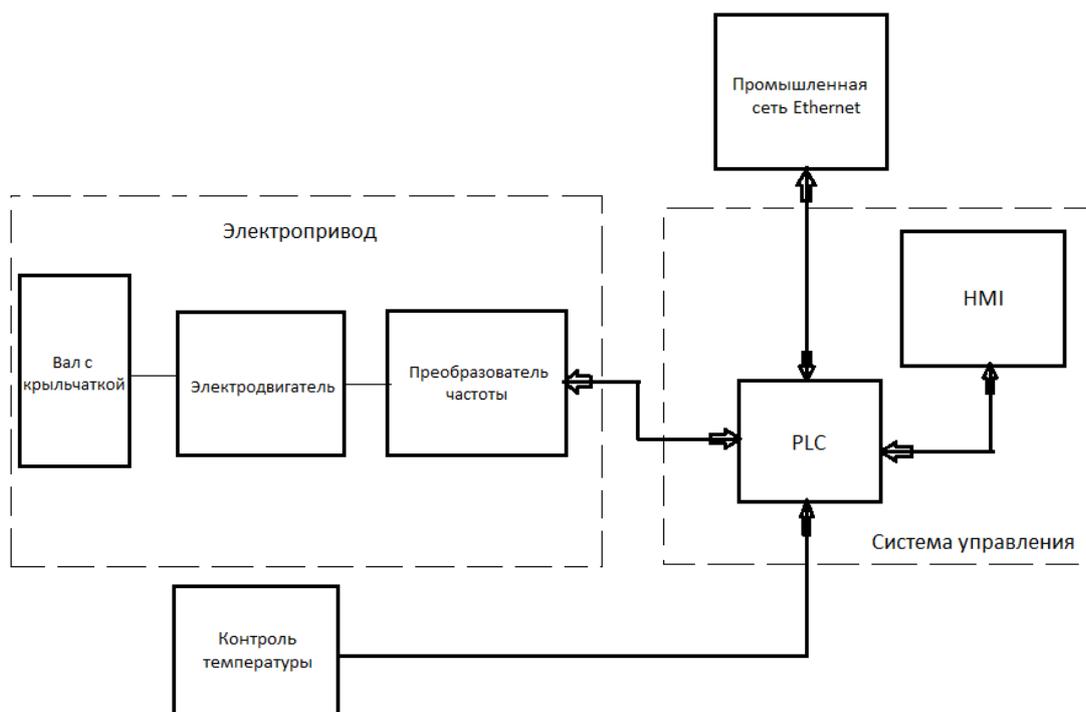


Рисунок 11 – Упрощенная структурная схема системы охлаждения

Параметры электропривода и настройки приводной системы в целом могут варьироваться в зависимости от технических характеристик и рабочих параметров охлаждаемого трансформатора. Для реализации приводной системы можно рассмотреть следующие пары устройств:

- сервопривод и серводвигатель;
- частотный преобразователь и асинхронный двигатель.

Обобщенный алгоритм работы разрабатываемой системы выглядит следующим образом. Система запускает вращение вентилятора охлаждения в пассивном режиме на фиксированной частоте, после чего контролирует разницу температур программной уставки и реальной температуры внутри корпуса трансформатора, передавая всю необходимую информацию на пульт оператора и в систему управления следующего уровня. При превышении допустимой номинальной температуры внутри защитного корпуса система увеличивает частоту вращения вентиляторов охлаждения, передавая информацию о состоянии на пульт диспетчера и панель оператора. На рисунке 12 представлен упрощенный алгоритм работы данной системы.

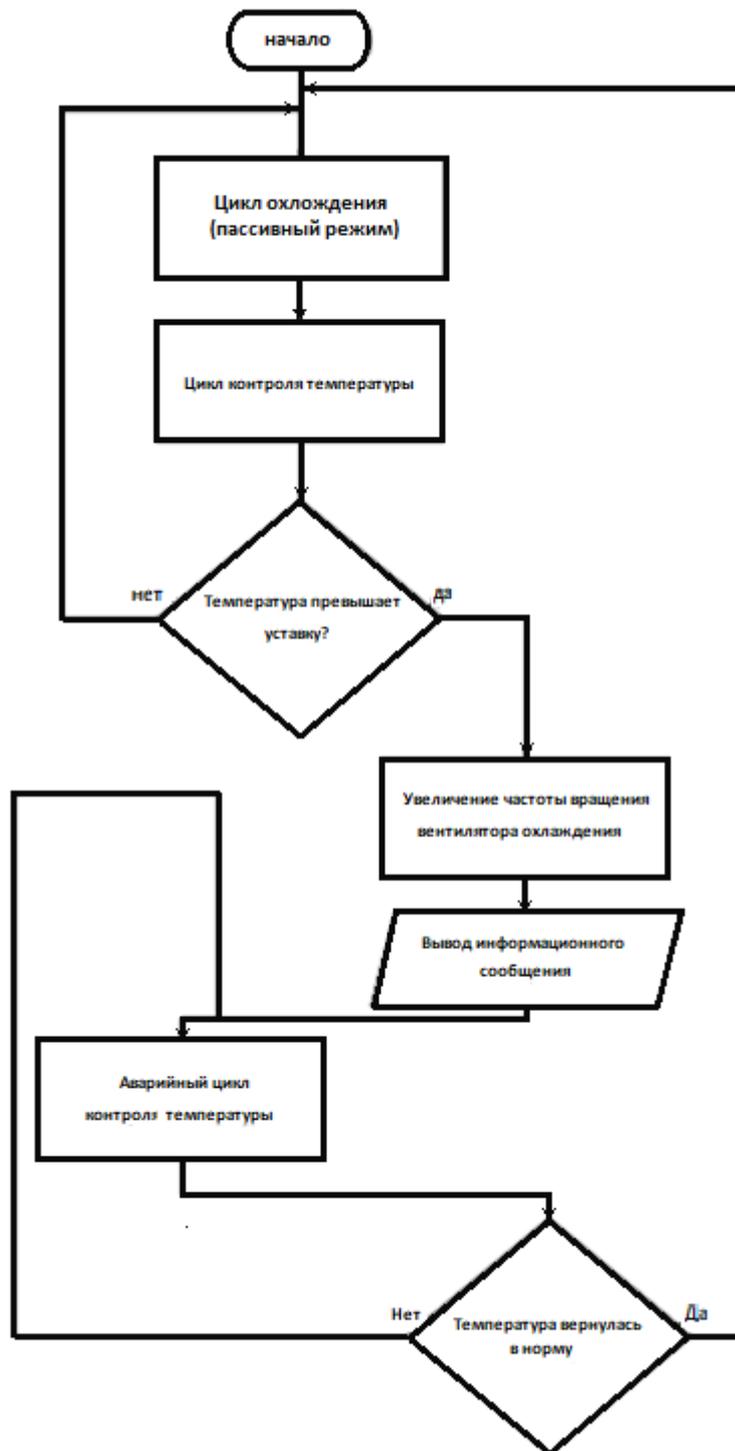


Рисунок 12 – Упрощенная блок-схема алгоритма работы системы охлаждения

Для реализации цели, поставленной при выполнении выпускной квалификационной работы, а именно повышение срока безаварийной и бесперебойной работы силовых трансформаторов а также конечное повышение качества поставляемой электроэнергии, по средствам разработки автоматизированной СД системы охлаждения силового трансформатора с возможностью ее функционирования как отдельной системы и предусматривая внедрение и использование ее основных алгоритмов и технических решений как средство модернизации существующих ДЦ систем охлаждения силовых трансформаторов.

Исходя из вышеперечисленного был составлен список задач, подлежащих решению, для достижения поставленной цели:

- разработка конечной структуры системы;
- разработка необходимых функциональных связей;
- подбор аппаратной составляющей системы управления;
- подбор аппаратной части остальных составляющих системы охлаждения;
- разработка программного кода управления;
- разработка функциональных экранов НМІ.

Выводы по разделу

В данном разделе выпускной квалификационной работы была поставлена основная концепция, цель выполнения проекта и список задач, которые необходимо решить в ходе работы. Были изучены основные положения касательно силовых трансформаторов, их классификации, назначении и различиях. Была изучена информация о специфике работы и классификации систем охлаждения, а также навесного оборудования силовых трансформаторов.

## 2 Разработка автоматизированной системы охлаждения

### 2.1 Выбор установки и расчет технологических параметров

В качестве целевой группы трансформаторов, для дальнейшей прикладной разработки системы охлаждения силового трансформатора с принудительным обдувом решено было выбрать распределительные сухие трансформаторы типа ТСЛ и ТСЛЗ мощностью от 250 до 2500 кВА и классом напряжения 6 и 10 кВ. В рамках выполнения данной выпускной квалификационной работы был выбран трансформатор ТСЛЗ-СЭЩ 1000 кВА. На рисунке 13 представлена расшифровка кодировки сухих трансформаторов данного типа.



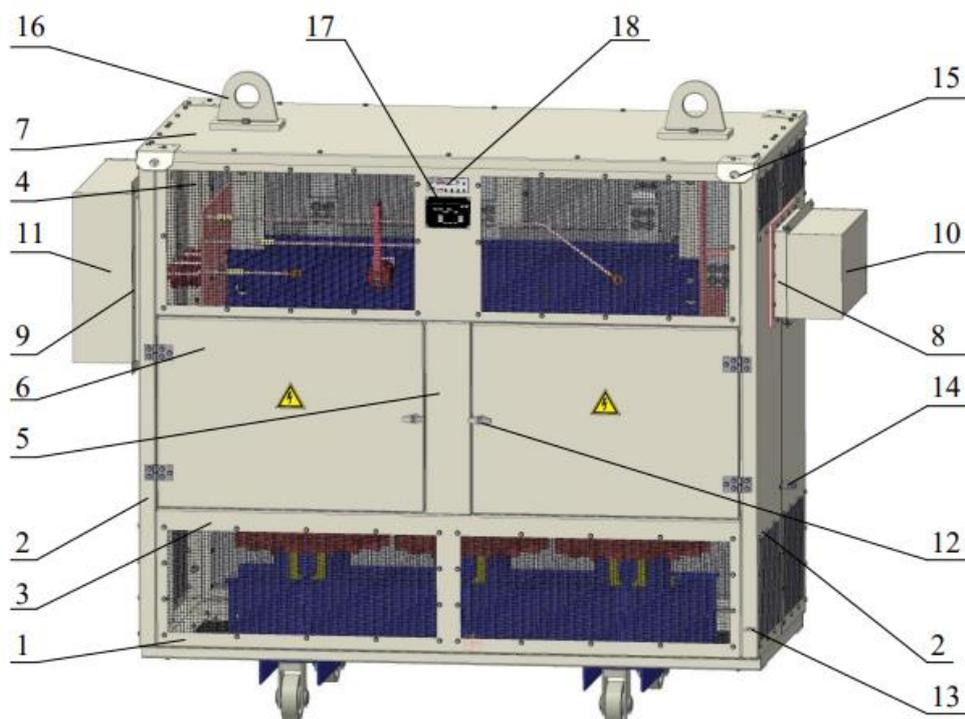
Рисунок 13 – Кодификация типа трансформатора

На рисунке 14 представлена таблица основных технических характеристик трансформаторов типа ТСЛ, заявляемых заводом-изготовителем.

Обозначение трансформатора	Номинальная мощность, кВА	Схема и группа соединения обмоток	Потери холостого хода, Вт	Потери короткого замыкания, Вт			Напряжение короткого замыкания, %	Ток холостого хода, %
				при 75 °С	при 115 °С	при 120 °С		
ТСЛ(З)-СЭЩ-250	250		680	2510	2845	2887	6	1.9
ТСЛ(З)-СЭЩ-400	400		980	3750	4255	4313	6	1.8
ТСЛ(З)-СЭЩ-630	630		1100	5912	6712	6799	6	1.6
ТСЛ(З)-СЭЩ-1000	1000	D/Y <sub>n</sub> -11	1550	8500	9654	9775	6	1.2
ТСЛ(З)-СЭЩ-1250	1250	Y/Y <sub>n</sub> -0	1900	10100	11475	11615	6	1.1
ТСЛ(З)-СЭЩ-1600	1600		2300	11850	13466	13628	6	1.0
ТСЛ(З)-СЭЩ-2000	2000		2690	13637	15319	15683	6	0.9
ТСЛ(З)-СЭЩ-2500	2500		3200	16700	18984	19205	6	0.8

Рисунок 14 – Технические характеристики трансформаторов ТСЛ

Класс нагревостойкости обмоток высокого и низкого напряжения для данных трансформаторов приравнивается к F, что свидетельствует о том, что приращение температуры между обмотками трансформатора и окружающей средой в штатном режиме не должна превышать 100 градусов по шкале Цельсия. Монтаж сухого трансформатора осуществляется внутри защитного корпуса, как показано на рисунке 15.



1 - дно; 2 - боковая панель; 3 - нижняя панель; 4 - верхняя панель; 5 - промежуточная панель; 6 - дверь; 7 - крыша; 8 - фланец НН; 9 - фланец ВН; 10 - защитный кожух НН; 11 - защитный кожух ВН; 12 - ручка; 13 - заземление; 14 – скоба; 15 - строповое ухо; 16 - подъемное ухо; 17 – паспортная табличка; 18 – температурное реле.

Рисунок 15 – Трансформатор серии ТСЛЗ-СЭЦ 250-2500 кВА

Трансформатор, который поставляется в открытом исполнении, иными словами с классом защищенности IP00 подлежит установке строго с учетом необходимого запаса расстояния от обмоток сухого трансформатора до стен защитного корпуса и помещения, при этом необходимо помнить, что изоляция трансформатора условно считается конструктивным элементом, частично находящимся под напряжением. На рисунке 16 представлены рекомендации по минимально необходимым расстояниям от обмоток трансформатора до любых заземленных и проводящих конструкций.

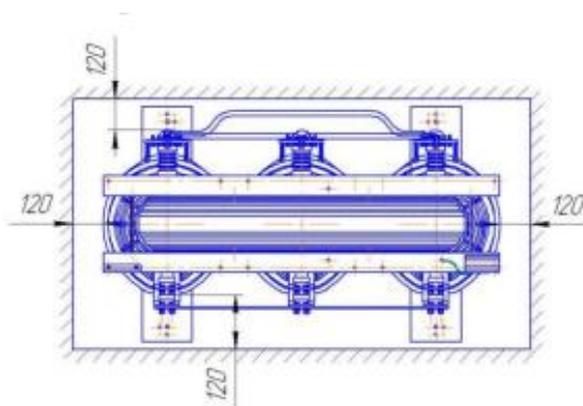
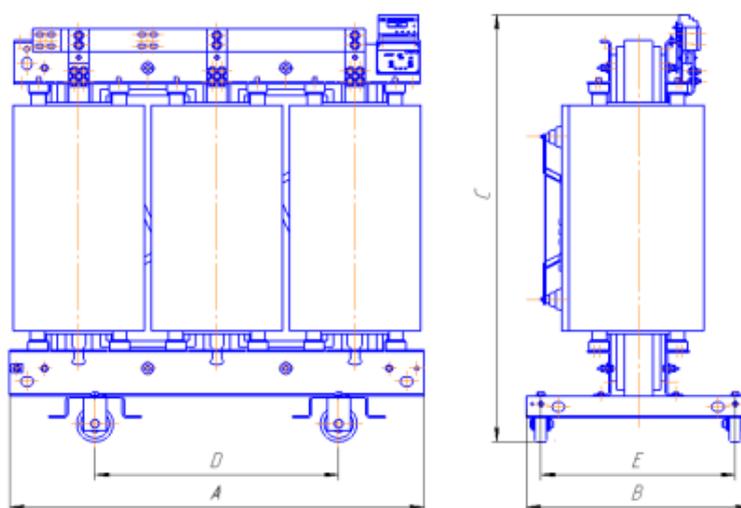


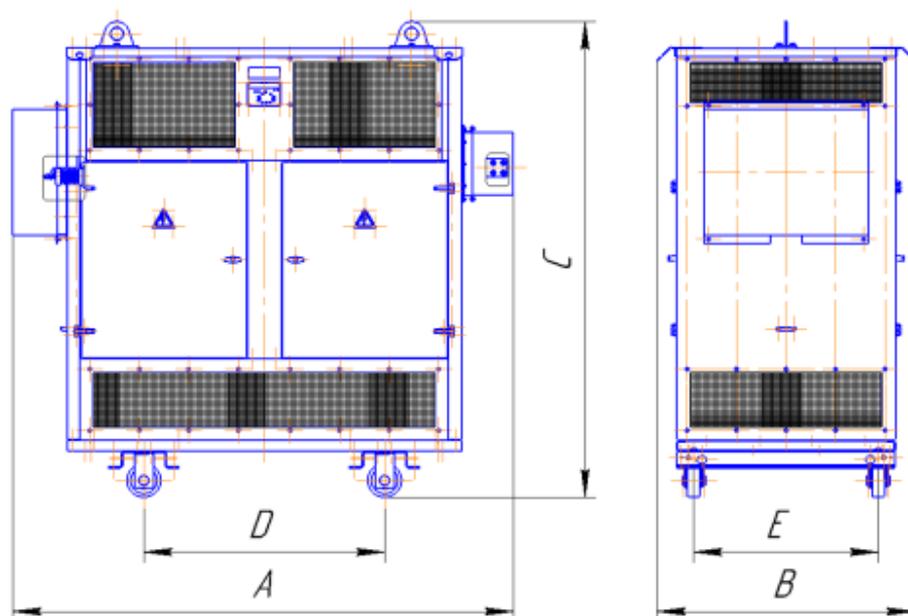
Рисунок 16 – Рекомендованное минимальное расстояние при установке

На рисунке 17 и 18 представлены основные габаритные и установочные размеры трансформаторов ТСЛ типа без защитного кожуха и с его использованием соответственно.



Номинальная мощность, кВА	Размеры, мм					Масса, кг
	A	B	C	D	E	
250	1135	620	1215	720	520	950
400	1280	770	1350	840	670	1500
630	1450	770	1445	840	670	2050
1000	1570	970	1640	1070	820	2800
1250	1660	970	1760	1070	820	3300
1600	1730	1100	1855	1070	820	4000
2000	1825	1270	2205	1070	1070	5000
2500	2000	1270	2160	1070	1070	6300

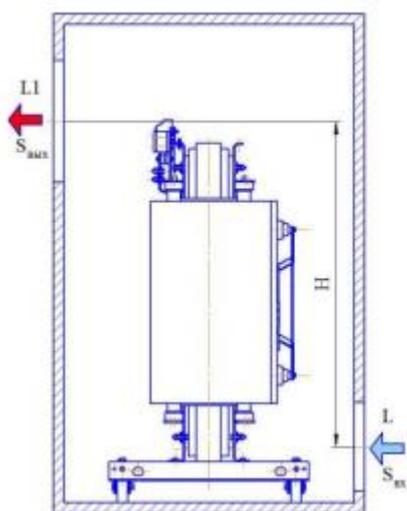
Рисунок 17 – Габаритные и установочные размеры ТСЛ



Номинальная мощность, кВА	Размеры, мм					Масса, кг
	A	B	C	D	E	
250	1850	800	1600	720	520	1150
400	1950	980	1850	840	670	1750
630	2075	1070	1990	840	670	2350
1000	2225	1145	2130	1070	820	3100
1250	2450	1080	2300	1070	820	3650
1600	2500	1180	2350	1070	820	4350
2000	2700	1270	2500	1070	1070	5500
2500	2900	1300	2900	1070	1070	6800

Рисунок 18 – Габаритные и установочные размеры ТСЛ трансформатора в защитном кожухе

В защитном корпусе или помещении, где устанавливается трансформатор необходимо обеспечить хорошую циркуляцию и воздухообмен для удаления излишков тепла, выделяемых при работе, для обеспечения штатной и бесперебойной работы силового агрегата. Минимальными требованиями к вентиляции помещения, куда планируется установка силового трансформатора является наличие проходного отверстия на нижней части стенки для забора холодного воздуха и отверстия на верхней части противоположной стенки для удаления горячего воздуха, как показано на рисунке 19.



$$S_{\text{вых}} = 1,1 S_{\text{вх}} ; S_{\text{от}} = \frac{0,18P}{\sqrt{H}}, \text{ где}$$

$P$  - суммарные потери трансформатора, (кВт),

$S_{\text{вх}}$  - площадь отверстия впуска воздуха (м<sup>2</sup>),

$S_{\text{вых}}$  - площадь выпускного отверстия (м<sup>2</sup>),

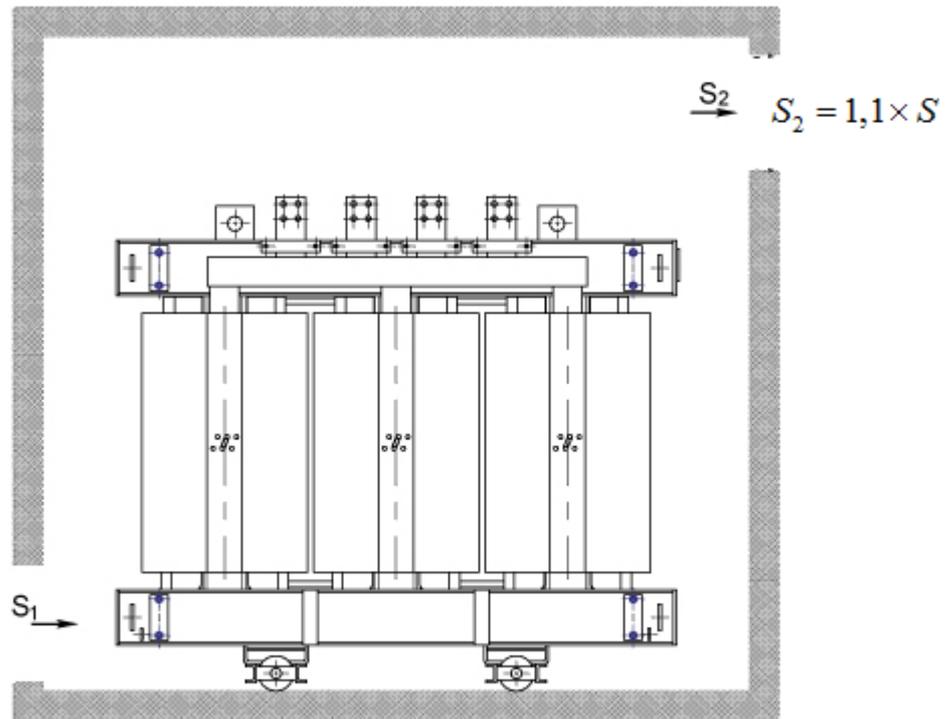
$H$  - высота расположения выпускного отверстия по отношению к впускному (м).

Рисунок 19 – Минимальные требования к вентиляции

В случае, если наблюдается недостаток естественного воздухообмена необходима дополнительная установка системы принудительного обдува и циркуляции воздуха внутри помещения с трансформатором. Данная система может как вытягивать горячий воздух, как и принудительно забирать более холодные массы воздуха и обдувать обмотки. Принудительная вентиляция необходима в тех случаях, когда:

- наблюдаются частые перегрузки;
- помещение плохо вентилируется;
- помещение имеет маленький объем;
- средняя температура может превышать 30 градусов.

Процесс расчета системы вентиляции и охлаждения для трансформатора включает в себя расчет необходимого диаметра вентиляционных отверстий и производительности системы вентиляции. Для расчета отверстий, необходимых для вентиляции защитного корпуса выбранного нами трансформатора ТСЛЗ-СЭЩ 1000 кВА воспользуемся схемой, представленной на рисунке 20.



$$S_1 = \frac{0,18 \times (P_{к.з.} + P_{хх})}{k \times \sqrt{H}}$$

Рисунок 20 – Расчет вентиляционных отверстий

Для расчета примем, что нормальный режим работы нашего трансформатора должен осуществляться при температуре до 100 градусов, что удовлетворяет классу нагревостойкости F. Потери короткого замыкания для выбранного нами трансформатора при 75 градусах по шкале Цельсия составляют 8500 Вт, потери холостого хода составляют 1550 Вт, коэффициент степени защиты у данных трансформаторов варьируется и составляет 1 для IP00 и 0.5 для IP21 и IP31, разницу высот между отверстием забора и выпуска воздуха с учетом воздушных зазоров и запасов по расстоянию примем равной 2 метрам. Таким образом, вентиляционное отверстие S1 нашего защитного корпуса должно иметь площадь порядка 2 м2, а отверстие S2 2.2 м2.

В случае, если невозможно обеспечить рассчитанную площадь вентиляционных отверстий или в случае отсутствия необходимых условий для эффективной естественной вентиляции, как в рамках выполнения нашей выпускной работы необходимо рассчитать производительность системы принудительной вентиляции, как показано на рисунке 21.

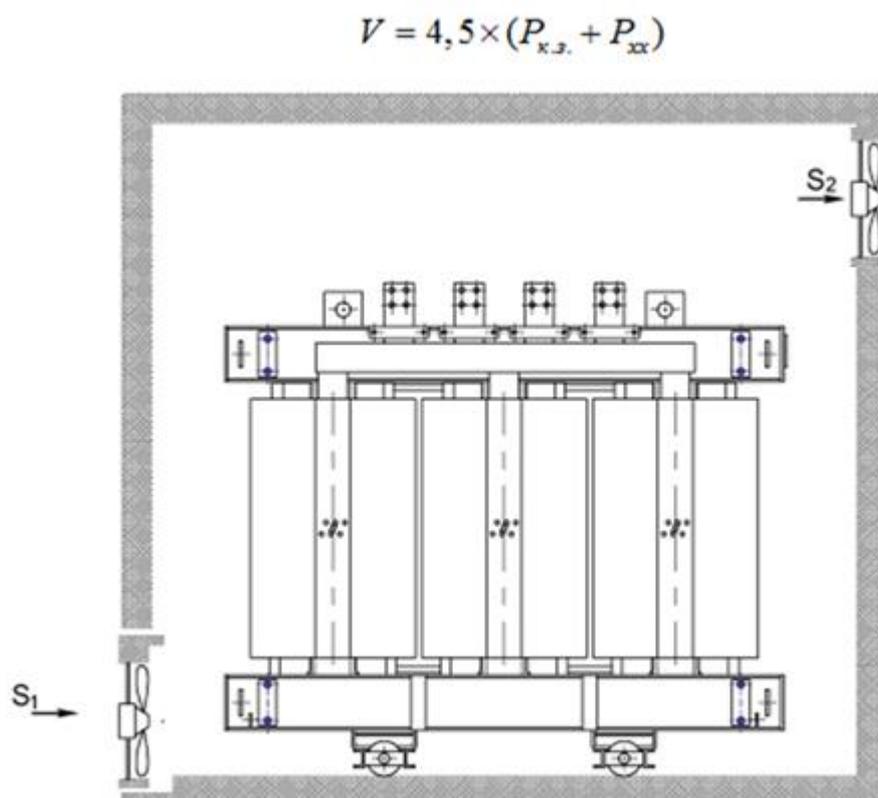


Рисунок 21 – Расчет производительности системы вентиляции

При наших исходных и расчетных параметрах, производительность принудительной системы вентиляции и охлаждения должна составлять 60 м<sup>3</sup>/мин. Исходя из полученных расчетов и исходных данных сформировали схему, отображающую габаритные размеры трансформатора, защитного корпуса и элементов системы вентиляции, представленную на рисунке 22.

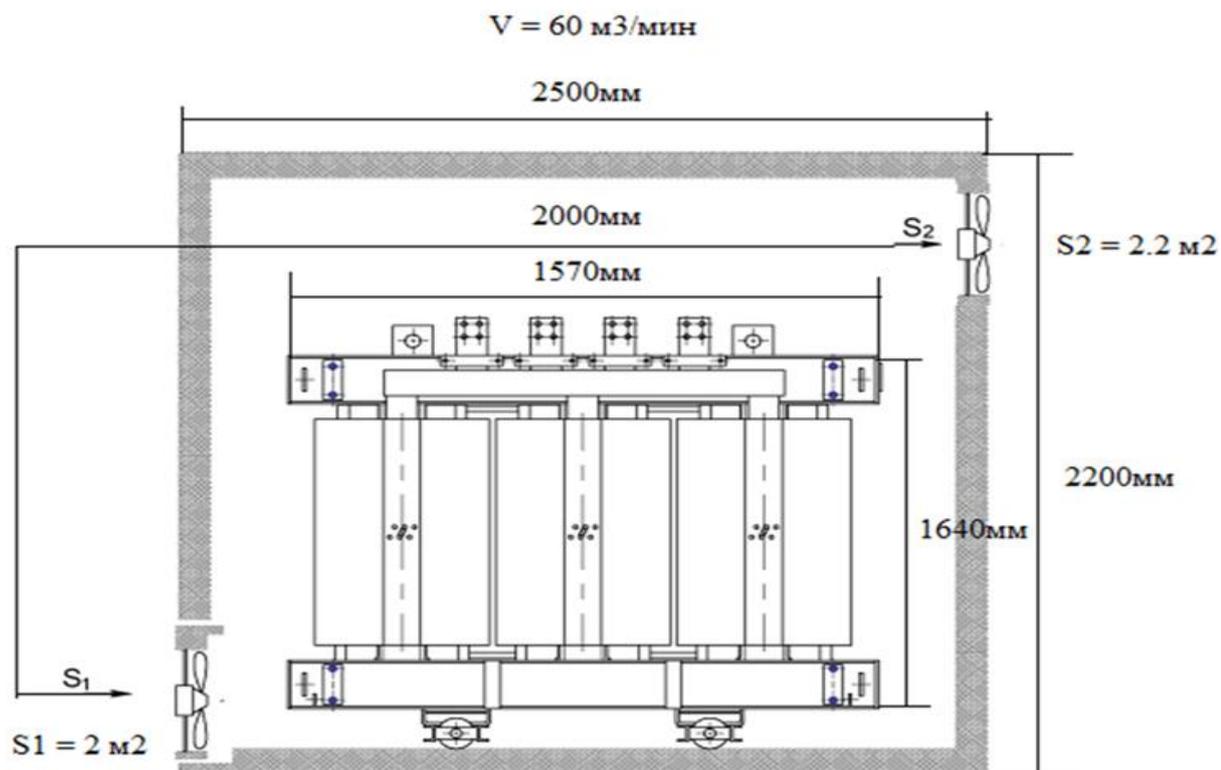


Рисунок 22 – Трансформатор в защитном корпусе с параметрами системы вентиляции.

Стоит отметить, что при использовании системы принудительного охлаждения и вентиляции, как в нашем случае, площадь вентиляционных отверстий может быть снижена вплоть до установочных размеров используемых вентиляторов, в случае если они обеспечивают минимально необходимую расчетную производительность вентиляционной системы.

## 2.2 Приводная часть

В современном мире большую роль играет автоматизация разнообразных технологических процессов, направленная на облегчение монотонного ручного труда, а также сложных или опасных для человека функциональных операций. Тем самым происходит качественное и количественное улучшение объемов и качества выполнения технологических операций и как следствие всестороннее повышение качества производимой продукции [16].

Неотъемлемой частью почти любой автоматизированной системы, подразумевающей выполнение какого-либо движения, к примеру, движение конвейера, движение рабочих осей станка с ЧПУ, подача инструмента и так далее является электромеханический привод [3]. На рисунке 23 представлена структурная схема электромеханического привода.

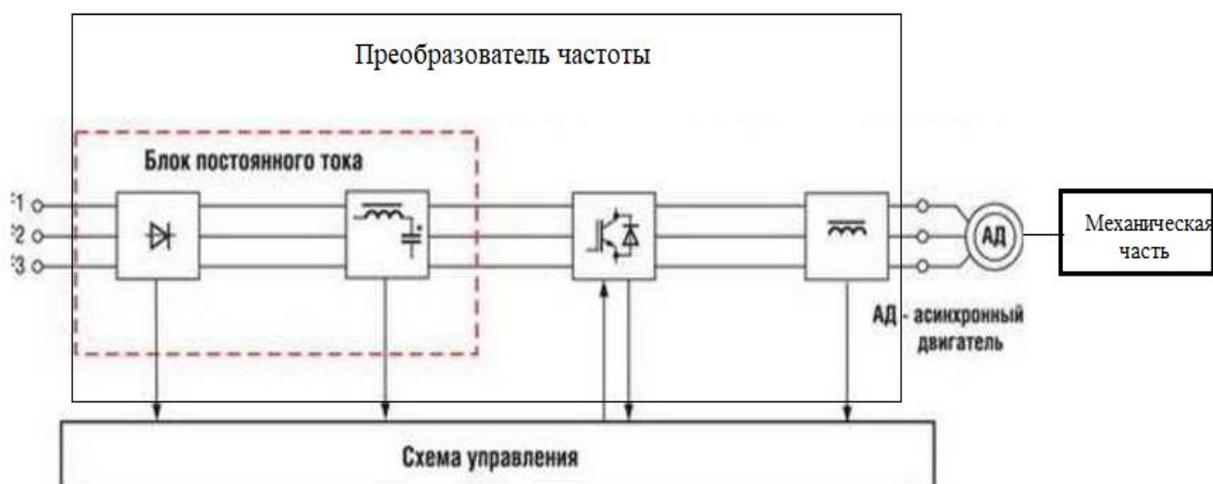


Рисунок 23 – Структурная схема электромеханического привода

Как видно из рисунка, представленного выше, электромеханический привод состоит из силовой части частотного преобразователя, включающей в себя входной фильтр и выпрямитель, промежуточный контур и блок инвертора. Помимо этого, в состав электромеханического привода входит система управления частотного преобразователя, электродвигатель или серводвигатель и непосредственно механическая часть, прикрепленная к валу двигателя. На рисунке 24 представлена более подробная схема силовой части привода, без конкретной привязки к модели и производителю.

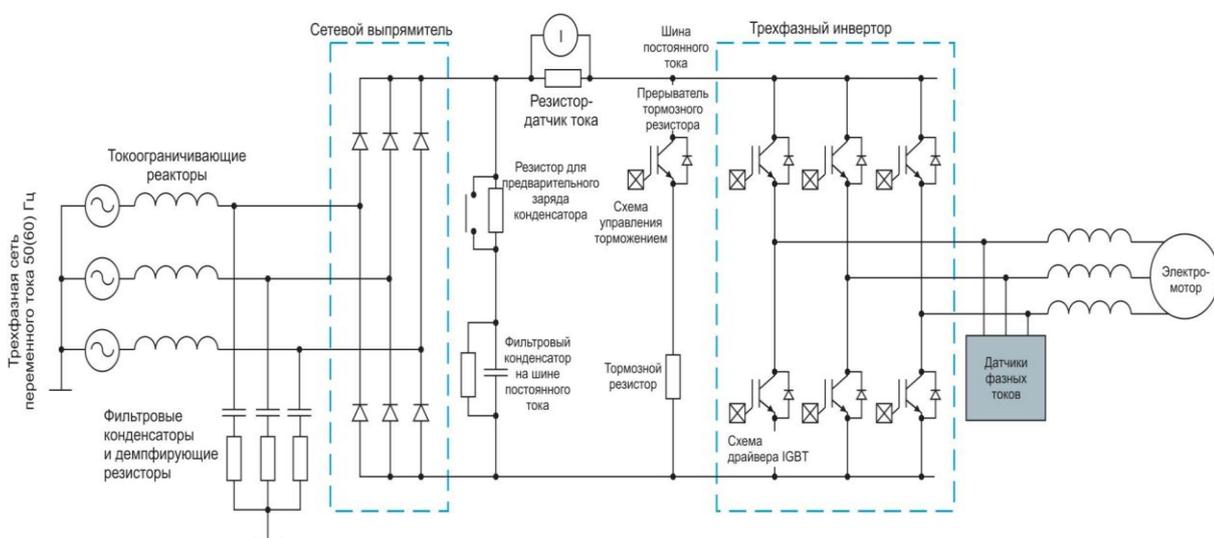


Рисунок 24 – Схема частотного преобразователя

На рисунке 25 представлен обобщенный пример подключения привода к двигателю и создания автоматизированной системы.

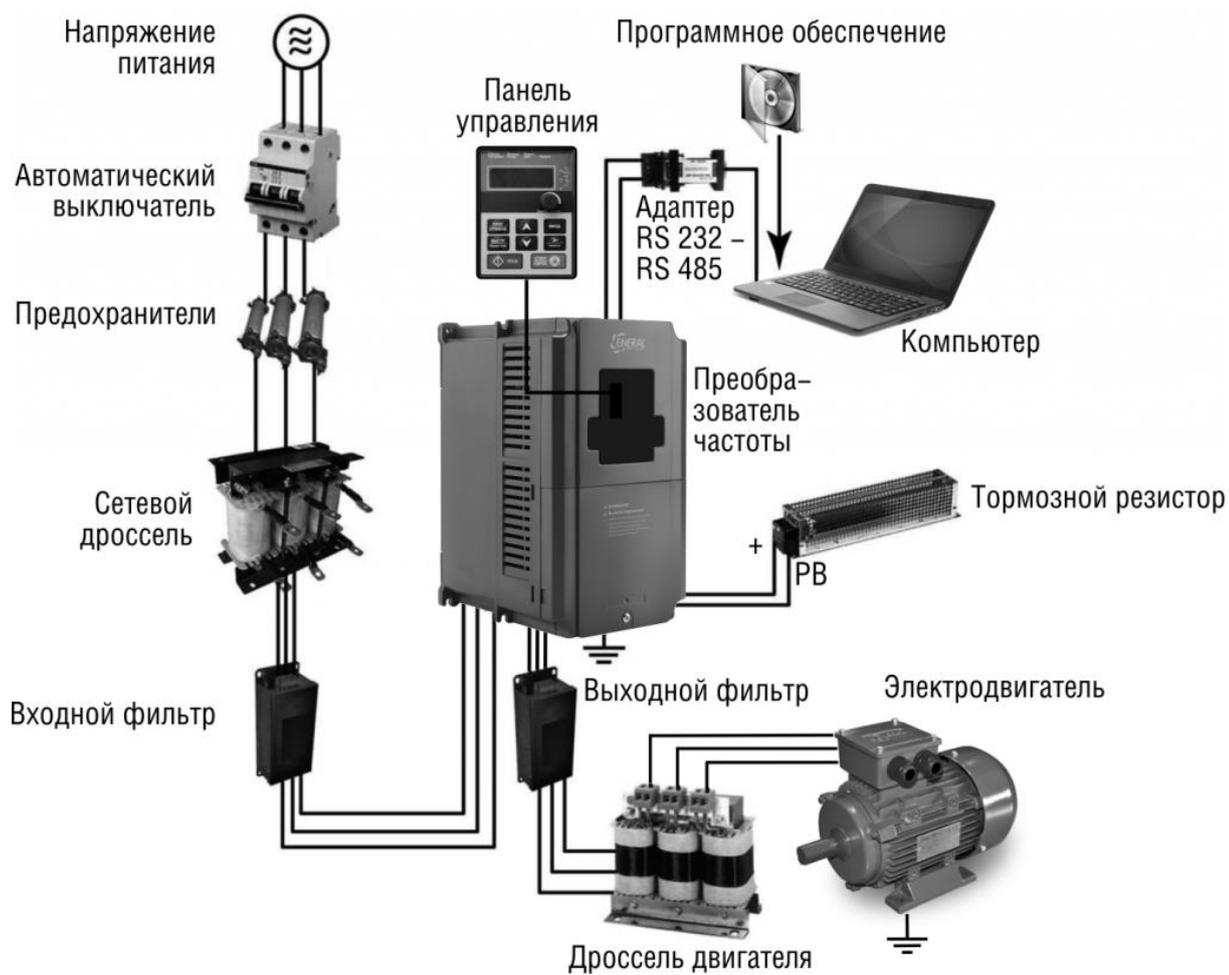


Рисунок 25 – Подключение привода к электродвигателю

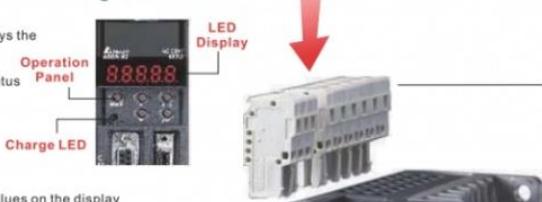
Как правило, частотными преобразователями управляют внешние устройства управления полевого уровня, такие как СЧПУ или ПЛК, функционирующие с приводом в рамках одной автоматизированной системы, однако встречаются решения, где функции основного управляющего устройства берет на себя собственная система управления привода, выполняя те или иные функции и движения, зависящие от поданных входных сигналов и программно настроенных параметров и реакций.

Для реализации приводной части автоматизированной системы в рамках выполнения данной выпускной квалификационной работы было решено использовать устройство (привод), сочетающий в одном корпусе силовую часть преобразователя частоты и его систему управления. В ходе анализа текущего рынка компонентов промышленной автоматизации было принято решение в пользу компонентов системы управления от компании Delta, в последнее время активно применяемым в производственных решениях на рынке России и Азии, ввиду своей относительной доступности и функциональности [17]. На рисунке 26 представлен привод ASDA-A2 фирмы Delta.

### Part Names and Functions

#### ● LED Display / Operation Panel / Charge LED

- **LED Display**  
The 5 digit, 7 segment LED displays the servo status or fault codes.
- **Operation Panel**  
Function keys used to perform status display, monitor and diagnostic, function and parameter setting.  
Function Keys:  
MODE : Press this key to select/change mode  
SHIFT : Press this key to shift cursor to the left  
UP : Press this key to increase values on the display  
DOWN : Press this key to decrease values on the display  
SET : Press this key to store data
- **Charge LED**  
A lit LED indicates that either power is connected to the servo drive or a residual charge is present in the drive's internal power components.



#### ● \* Full-Closed Loop Control Interface

- Used to connect linear scale and encoder for controlling A, B, Z phase signals.

#### ● I/O Interface

- Used to connect Delta's DVP series PLC or other external controllers for controlling I/O signals.

#### ● \* High-speed Communication Port

- Used to connect CANopen networks.
- 1-in/1-out communication ports offer easy serial connection.
- CANbus interface, supporting motion modes for CANopen DS402 implementation.

#### ● Motor Encoder Interface

- Used to connect the encoder of the servo motor

#### ● \* Extension Digital Input Connection Port

- Used to connect a removable digital input terminal block. Max. 6 digital inputs can be added.

#### ● Serial Communication Port

- Used to connect PLC, HMI, and other controllers for RS-485 / RS-232 serial communication.

#### ● USB Connection Port

- Used to connect personal computers or notebooks.
- Ver 1.1 USB is equipped as standard.
- Direct connectivity to personal computers or notebooks, capable of accessing data through ASDA-Soft configuration software.
- Monitor speed upon software is up to 1Mbps.



\* Extension Digital Input Connection Port not included in ASDA-A2-M (The default stock model)

Рисунок 26 – Привод Delta ASDA-A2

Данный привод имеет множество вариаций, отличающихся набором параметров и функционала, предназначенных для управления двигателями разной мощности, выполнения разного рода операций и поддерживает такие режимы работы и управления как внутреннее позиционирование по скорости и перемещению, режим интерполяции, а также управление по телеграмме CANOpen и при помощи стандартных программных блоков, передаваемых от внешнего контроллера через Ethernet интерфейс [1]. На рисунке 27 представлено функциональное назначение разъемов, представленных на корпусе привода ASDA-A2.

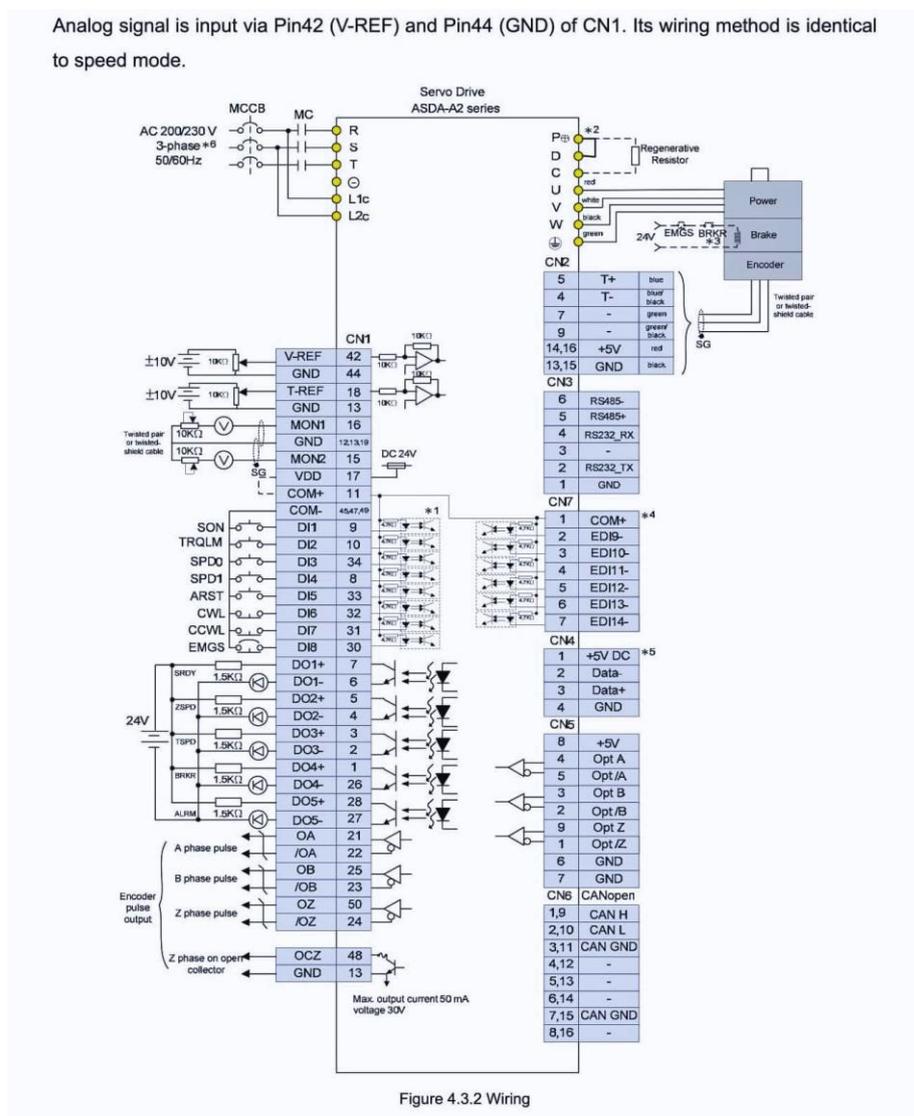


Рисунок 27 – Функциональное назначение разъемов ASDA-A2

На рисунке 28 представлен пример подключения привода ASDA-A2 фирмы Delta.

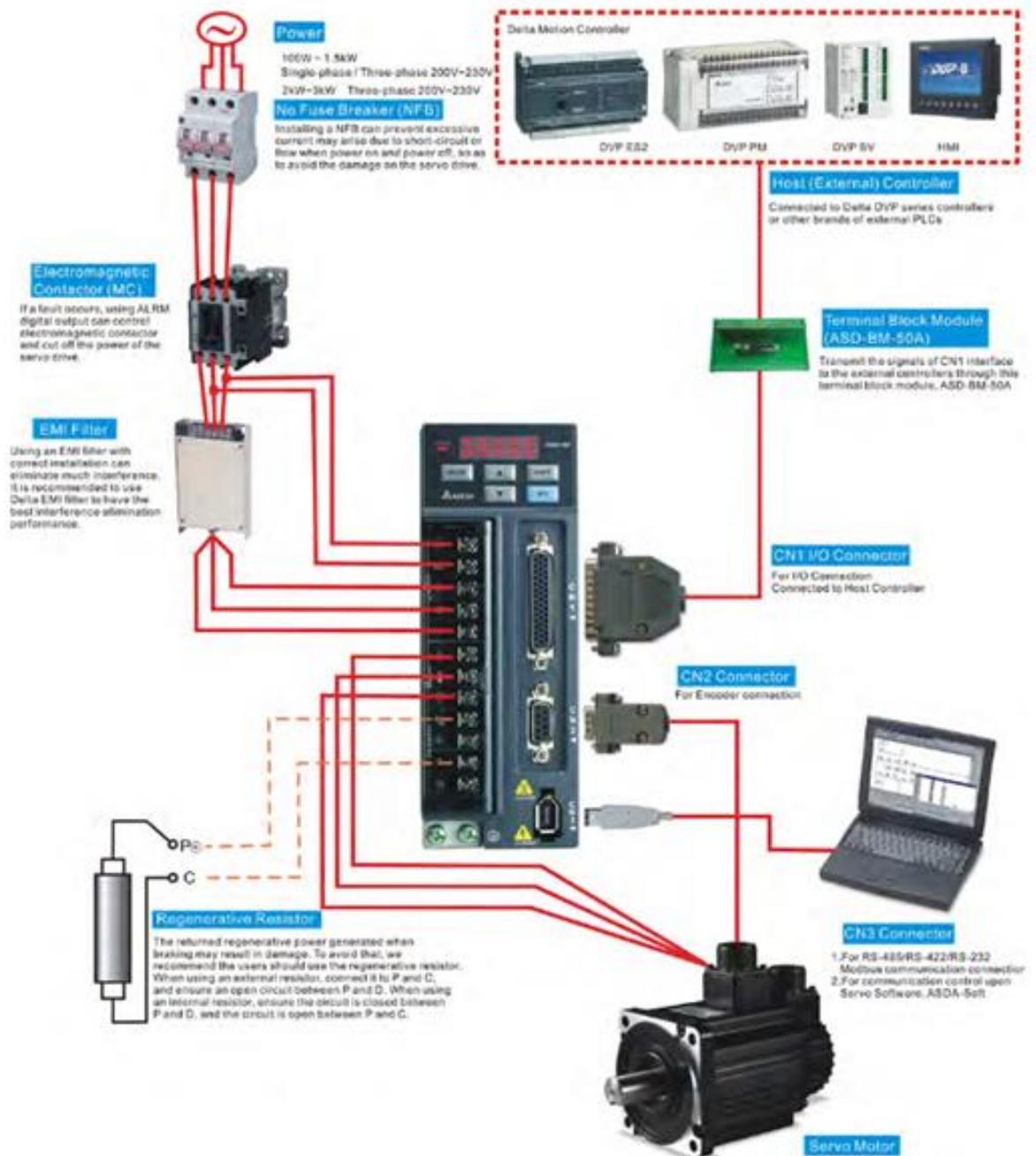


Рисунок 28 – Пример подключения привода ASDA-A2 фирмы Delta

Привод ASDA-A2 сочетает в себе силовую часть преобразователя частоты и его систему управления и оснащен встроенным энкодером с разрешением 1280000 импульсов на оборот, с возможностью изменения данного соотношения и регулировкой электронного редуктора, что гарантирует стабильную и точную работу и позиционирование даже на разных скоростях и режимах работы.

“Высокая динамика. Полоса пропускания до 1 кГц. Время изменения скорости двигателя от -3000 до 3000 об/мин составляет 10мс (без нагрузки). Превосходное подавление вибрации. Встроенная функция автоматического подавления низкочастотной вибрации реализована с помощью двух фильтров, минимизирующих и полностью устраняющих вибрацию исполнительного механизма” [3].

Для коммуникации, параметрирования и управления приводом ASDA-A2 может быть использовано специализированное программное обеспечение ASDA-A2 Soft, встроенный порт CN6 для коммуникации по Ethernet, EtherCAT и CANopen, а также встроенная панель параметрирования [14]. На рисунке 29 представлен экран рабочей области программного обеспечения ASDA-A2 Soft.

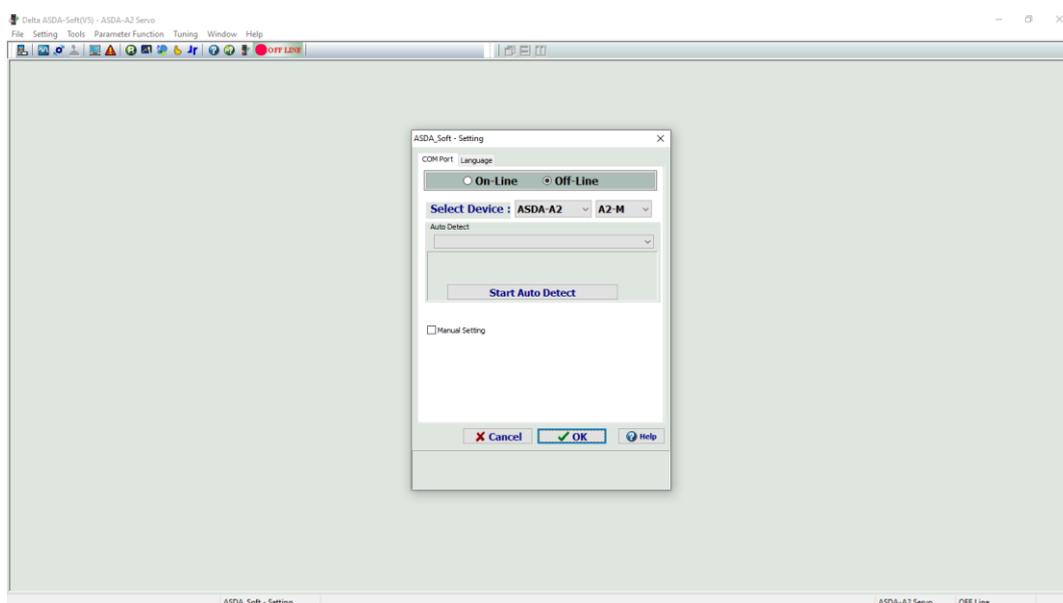


Рисунок 29 – ASDA-A2-Soft

Специализированное программное обеспечение ASDA-A2-Soft предоставляет обширный набор встроенных инструментов для работы с рассматриваемым приводом. При помощи данной программы можно производить параметрирование, отладку и управление приводом по прописанному сценарию. На рисунке 30 представлено рабочее окно настройки параметров для привода ASDA-A2.

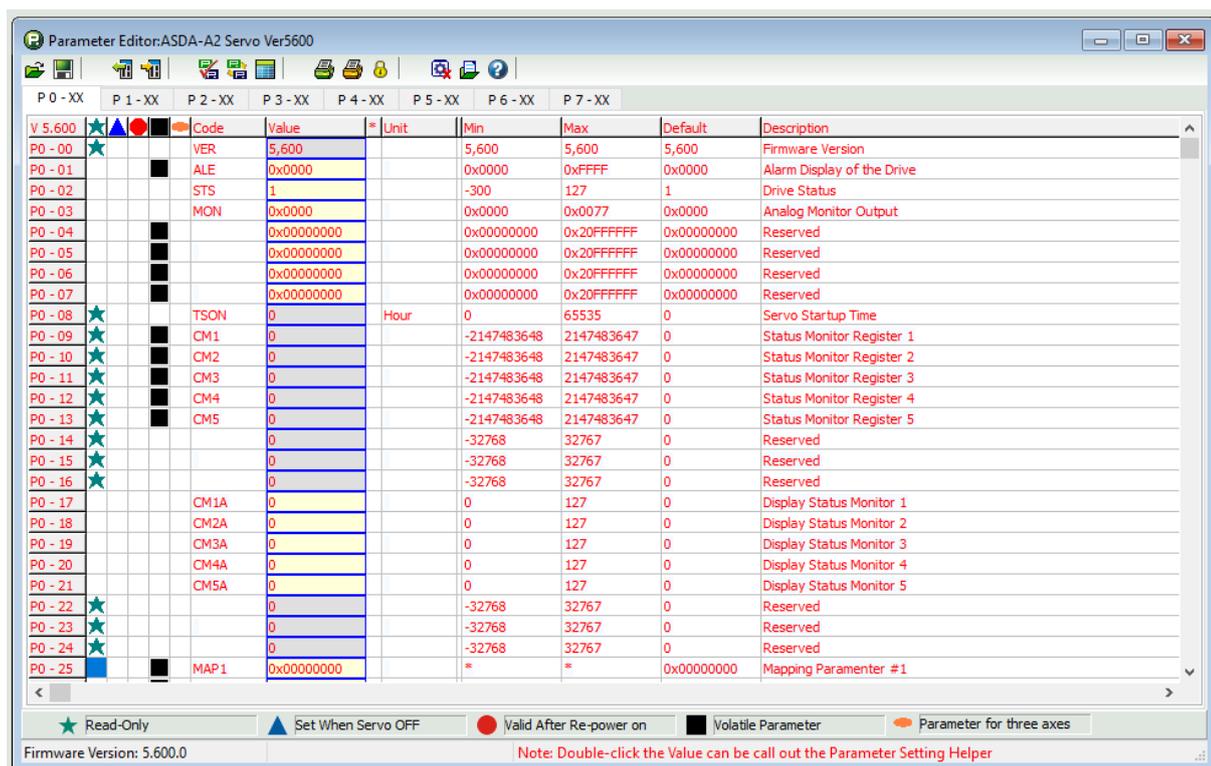


Рисунок 30 – Окно параметрирования ASDA-A2

Изначально, при загрузке программы в офлайн режиме или при подключении к приводу в онлайн режиме на экране настройки параметров будут отображены заводские установки, соответствующие выбранной версии и модификации привода. При необходимости группы параметров можно загрузить или выгрузить из существующего привода для дальнейшей настройки режимов работы и прочих функциональных особенностей.

Помимо того, ASDA-A2 Soft оборудован внутренними инструментами диагностики и наладки, к примеру настройкой коэффициента редукции и крутящего момента, как показано на рисунке 31.

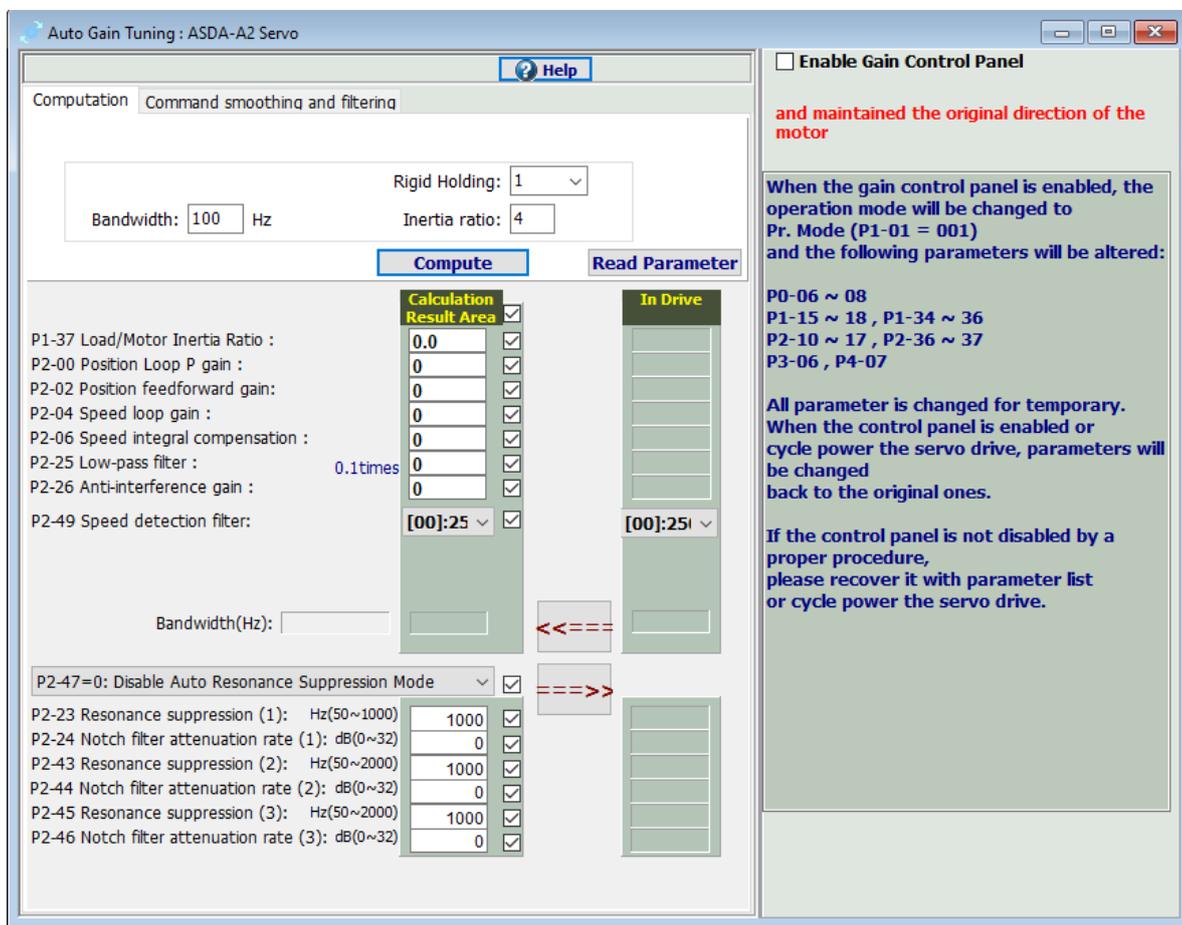


Рисунок 31 – Автоматическая настройка редукции и крутящего момента

Данная функция позволяет в автоматическом режиме настроить рабочие параметры крутящего момента и редукции, однако, данный способ подстройки с подключенной механикой имеет ряд своих условностей и недостатков. ASDA-A2 Soft предоставляет возможность настройки и расчета передаточных устройств шарикового винта (ШВП), как показано на рисунке 32.

Delta ASDA\_M sizing

SI MI 1. English

### Transmission device of ball screw

User Input Parameter	Value	Unit	Description
1/RN	1		JR deceleration ratio
V	10	(m/min)	Platform moving speed
S	200	(mm)	Moving distance for single route(DL)
F	0	(N)	Force
rho	0,02266	(kg/m^3)	specific gravity
u	0,1		Friction coefficient of rail guides
h	0,85		Transmission efficiency from motor to lead screw
tA	0,257	(sec)	Motor acceleration time
tD	0,257	(sec)	Motor deceleration time
tS	0	(sec)	Stop time
ML	5	(kg)	Load weight
MT	5	(kg)	Moving platform weight
PB	5	(mm)	Pitch of lead screw
LB	500	(mm)	Length of lead screw
DB	20	(mm)	Outer diameter of lead screw
JR	0	(kg*m^2)	Inertia of deceleration machine

Calculate

Calculate Process	Calculate Result	Suggest Matches
dS	5	(m/rev) Screw moving distance for a revolution of
dP	0	(m/pulse) accuracy
NV	2400	(rpm) Motor speed
tE	0,8431	(sec) Motor constant-speed time
tR	0,04285714285	(sec) Settling time
tM	1,5	(sec) Time for positioning
tP	1,5	(sec) Time for single route(DL)
JF	0,0001	(kg*m^2) Equivalent motor inertia when moving the
JB	6,18E-5	(kg*m^2) Inertia of lead screw
JL	0,0009738	(kg*m^2) Total inertia of load end

Рисунок 32 – Расчет и настройка ШВП

Также данная программа способна строить и выводить динамические графики разных параметров для построения servo trace, как показано на рисунке 33.

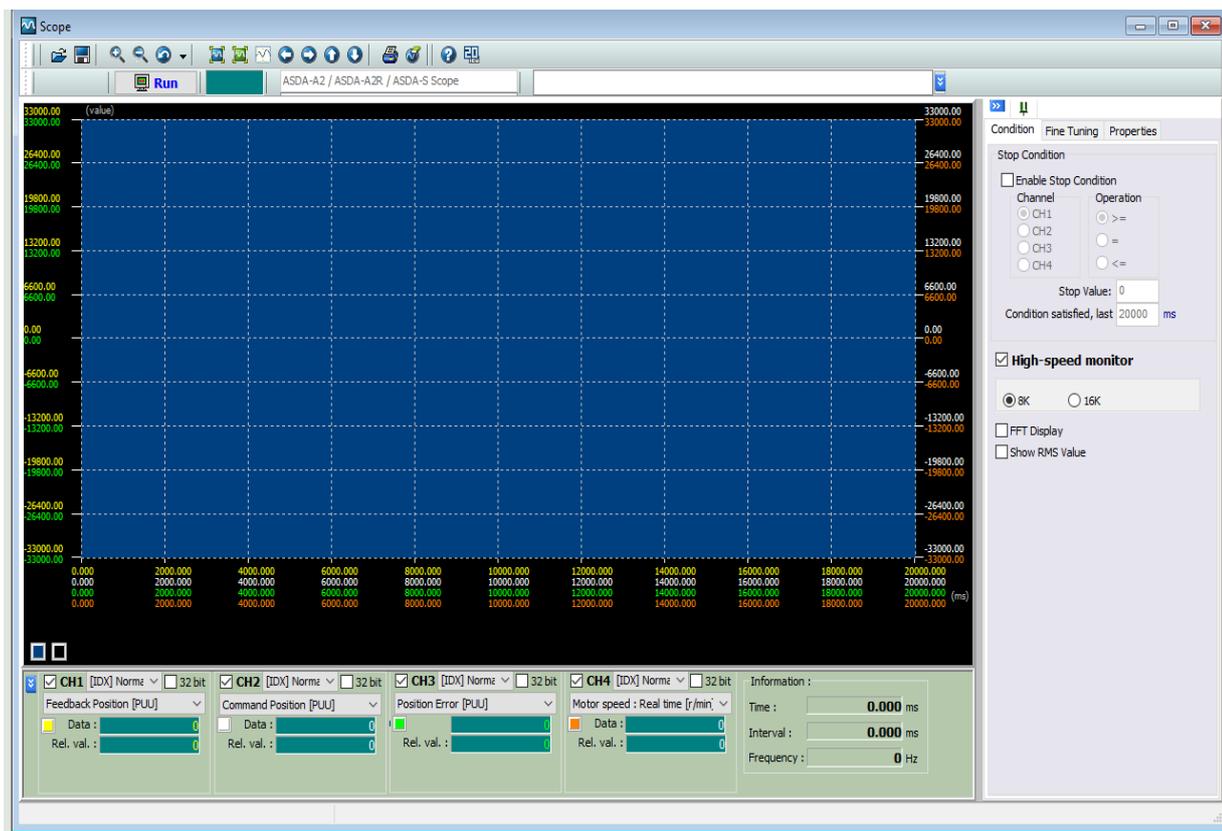


Рисунок 33 – Встроенный инструмент для построения графиков

Помимо вышеописанного ASDA-A2 Soft также обладает, к примеру, такой встроенной функцией как быстрое преобразование Фурье FFT, что позволяет увеличить эффективность подавления резонансных частот, возникающих в ходе работы и функцией электронного кулачка E-CAM, поддерживающего до 720 позиций.

В случае невозможности подключения программатора к приводу ASDA-A2 настройку работы и параметрирование можно выполнить при помощи бортовой панели, представленной на рисунке 34 [9].



Элемент	Назначение
ЖК-индикатор	5-разрядный 7-сегментный LED-индикатор предназначен для вывода номеров параметров, значений параметров, индикации режима и состояния привода.
Светодиод питания	Индикация наличия силового питания привода.
Кнопка «MODE»	Переключение режимов состояния и программирования.
Кнопка «SHIFT»	Переключение номера групп параметров. Переключение разряда при установке значения выбранного параметра. Разряд, выбранный для изменения, будет мигать.
Кнопки «UP» и «DOWN»	Кнопками «Вверх» и «Вниз» устанавливается номер параметра в группе параметров, а также его значение.
Кнопка «SET»	Клавиша сохранения значения параметров, перехода из группы на номер параметра. В режиме мониторинга нажатие кнопки «SET» переключает десятичный и шестнадцатиричный режимы индикации. В режиме параметров нажатие кнопки «SET» вводит в режим настройки параметров. В режиме диагностики нажатие кнопки «SET» позволяет выполнить функцию в последнем шаге. (Изменения параметра вступает в действие только после нажатия кнопки «SET».)

Рисунок 34 – Бортовая панель ASDA-A2

При помощи данной панели можно изменить любой параметр, доступный для данной модификации привода, настроить режим работы и задать алгоритмы функционирования без участия устройства управления.

Использование привода ASDA-A2 способно обеспечить полный замкнутый контур позиционирования, благодаря встроенному разъему CN5 для подключения внешнего датчика положения, выполненного в виде внешнего энкодера или оптической линейки, что организует второй замкнутый контур позиционирования системы по положению. Данная функция применима при решении задач, где необходима высокая точность позиционирования осей [11].

Привод ASDA-A2 позволяет настроить и задать до 64 уставок положения в режиме внутреннего позиционирования, поддерживает 5 способов управления и 35 видов процедуры выхода в исходную, поддерживает программируемые переходы, режимы записи параметров, скоростных и позиционных значений, а также функции захвата и сравнения координаты в режиме текущего времени. ASDA-A2 поддерживает гибкую настройку каналов DI/DO и способен без задержек активировать каналы DO при достижении координаты уставки [15].

В ходе реализации проекта в рамках данной выпускной квалификационной работы будет использован режим управления приводом по сетевому интерфейсу CANOpen при помощи телеграммы от устройства управления, в роли которого будет выступать программируемый логический контроллер [16-17]. На рисунке 35 представлена схема подключения привода ASDA-A2 в режиме управления по CANOpen.

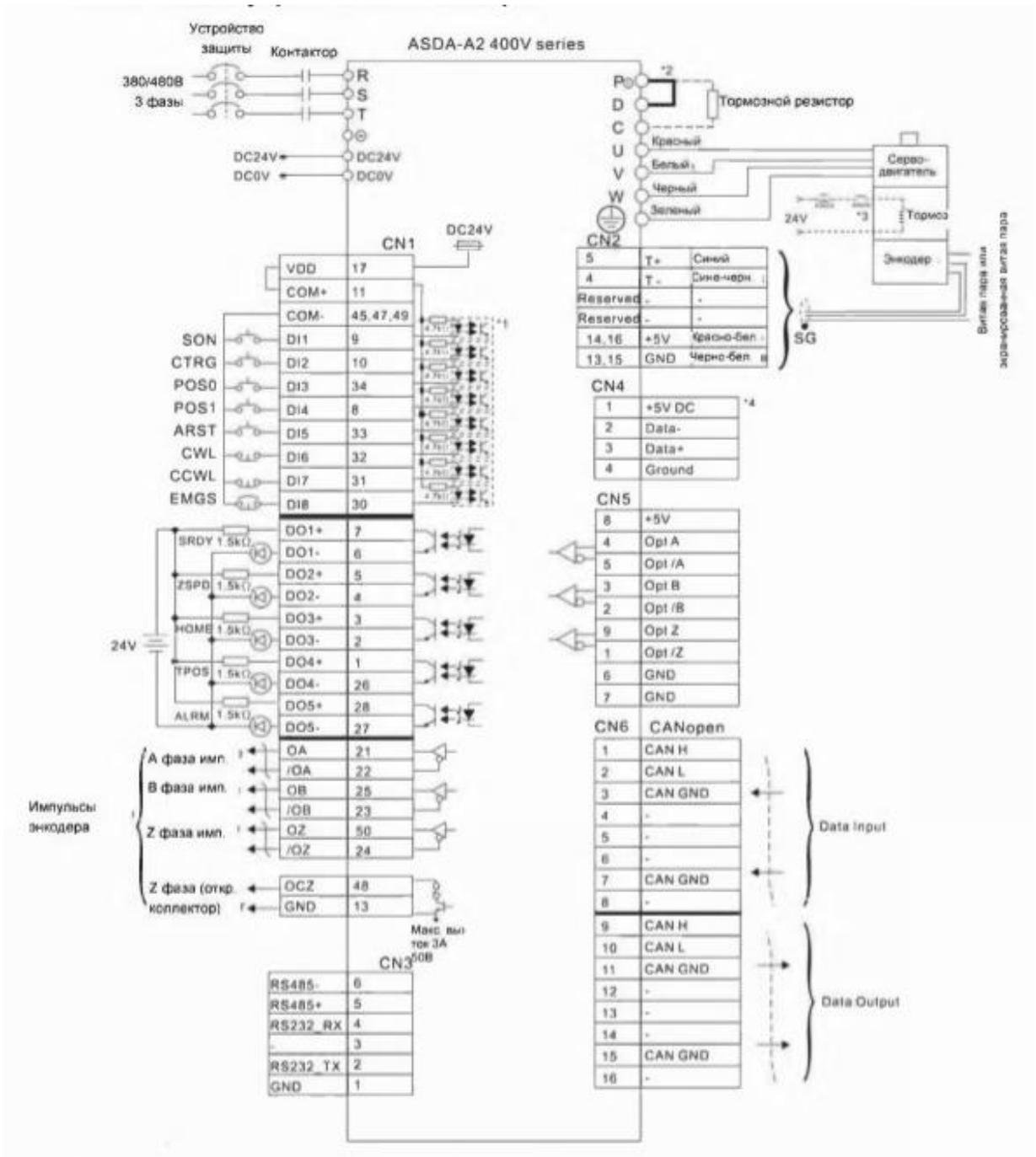


Рисунок 35 – Подключение ASDA-A2 в режиме управления по CANOpen

После выбора привода и наличия технологических данных, полученных нами в начале данной главы, мы можем подобрать электродвигатель и его механическую часть в виде крыльчатки вентилятора охлаждения. Для сравнения и упрощения процесса подбора рассмотрим вентилятор охлаждения в сборе с электродвигателем, представленный на рисунке 36.



Рисунок 36 – Осевой вентилятор охлаждения с электродвигателем

На рисунке 37 представлены основные технические характеристики вентилятора охлаждения такого типа.

ДИАМЕТР, мм	ОБОЗНАЧЕНИЕ	Двигатель		РАСЧЕТНАЯ РАБОЧАЯ ТОЧКА		Уровень звуковой мощности
		Мощность	Обороты*	Производительность	Полное давление	
		кВт	об/ мин	м <sup>3</sup> *1000/ч	Па	
500	K500-0,25-6-6/6-45-3AOTp	0,25	1000	4,5	76	70,8

Рисунок 37 – Основные характеристики осевого вентилятора охлаждения

Из рисунка выше видно, что рассматриваемый вентилятор охлаждения с двигателем мощностью 0.25 кВт и рабочими оборотами 1000 об/мин при рабочем диаметре вентилятора 500 мм имеет производительность 75 м<sup>3</sup>/мин. Рассчитанные нами ранее значения площади вентиляционных отверстий составляют 2 и 2.2 метра для отверстия забора и выпуска соответственно,

исходя из этого диаметр отверстий S1 и S2 составляет 1.6 и 1.7 метра соответственно, а производительность вентиляционной системе при принудительном охлаждении ровняется 60 м3/мин. При наличии запаса по производительности вентиляционной системы в 15 м3/мин при необходимых 60 м3/мин, даже без учета замены электродвигателя, допускается уменьшение площади вентиляционных отверстий, поэтому механическая часть в виде крыльчатки и защитного корпуса диаметром 500 мм может быть использована в рамках выполнения нашей выпускной квалификационной работы.

Для подбора и сравнения электродвигателей воспользовались программой DIASelector 1.2 от фирмы Delta, один из режимов в данной программе позволяет подобрать двигатели под конкретные задачи, а также сравнить в одном окне несколько выбранных электродвигателей и выбрать наиболее оптимальный. Функционал выбора и сравнения электродвигателей фирмы Delta в среде DIASelector 1.2 представлен на рисунке 38.

Specification	ECMA ECMA-C10804F7	ECM-A3 ECM-A3L-C10604F	ECM-B3 ECM-B3M-FP1830	ECMC ECMC-EW1320CS
Maximum Current (Arms)	7,8	10,1	58,9	33
Maximum Speed (rpm)	5000	6000	3000	3000
Maximum Torque (N-m)	3,82	4,45	57,29	28,7
Motor Frame (mm)	80	60	180	130
Oil Seal	Not Available	Available	Available	Available
PROFIBUS	False	False	False	False
Rated Current (Arms)	2,6	2,65	18,21	11,01
Rated Output Power (kW)	0,4	0,4	3	2
Rated Speed (rpm)	3000	3000	1500	2000
Rated Torque (N-m)	1,27	1,27	19,1	9,55
Rated Voltage (V) and Speed (RPM)	220V AC/ 3000 RPM	220V AC/ 3000 RPM	220V AC/ 1500 RPM	220V AC/ 2000 RPM
Rotor Moment of Inertia (x 10 <sup>4</sup> kg-m <sup>2</sup> )	0,73	0,15	53,63	14,6
RS232	False	False	False	False
RS422	False	False	False	False
RS485	False	False	False	False

Рисунок 38 – Функционал выбора и сравнения DIASelector 1.2

После проведения анализа и сравнения электродвигателей, подходящих под выбранный нами привод и задачу, реализуемую в рамках выполнения данной выпускной квалификационной работы, был выбран двигатель переменного тока ЕСМА-СА0910PS, представленный на рисунке 39.

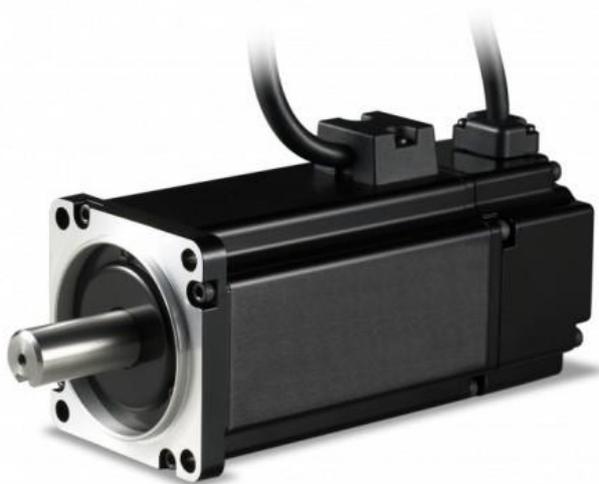


Рисунок 39 – Двигатель переменного тока ЕСМА-СА0910PS

Использование двигателя ЕСМА-СА0910PS мощностью 1 кВт и максимальной частотой вращения вала 3000 об/мин с запасом перекрывает необходимую нам производительность вентиляционной системы при условии использования выбранной ранее крыльчатки и механической части вентилятора охлаждения.

## 2.3 Автоматизация системы

В рамках выполнения данной выпускной квалификационной работы в качестве устройства управления был использован программируемый логический контроллер Delta AS320T, представленный на рисунке 40 [18].



Рисунок 40 – PLC Delta с процессорным модулем AS320T-B

На рисунке 41 представлены основные характеристики выбранного процессорного модуля.

Основные характеристики AS300:

- USB, 2 x RS-485, Ethernet, IP
- Удаленный I/O CANopen (при установке модуля AS00SCM-A и платы расширения AS-FC0PM)
- Карта памяти Micro SD, объем до 32 Гб
- 128K шагов прикладной программы
- Базовая инструкция 25 нс
- 6 импульсных групп по 200кГц
- 4 АВ-счетчика по 200кГц
- 1024 точки дискретного ввода/вывода (макс. расширения 32 модуля)
- 283 задачи: 32 циклические, 251 по прерываниям различного типа
- Позиционирование по шине CANopen (DS301)
- Скорость выполнения программ: LD - 25 нс, MOV - 0.15 мкс, FLOAT - 1.6 мкс, TRIGONOMETRIC - 3.5 мкс

Рисунок 41 – Заявленные характеристики серии AS300

Данная серия программируемых логических контроллеров является модульной без шинного подключения питания и жесткой адресации. Монтаж модулей производится на DIN рейку, как показано на рисунке 42.

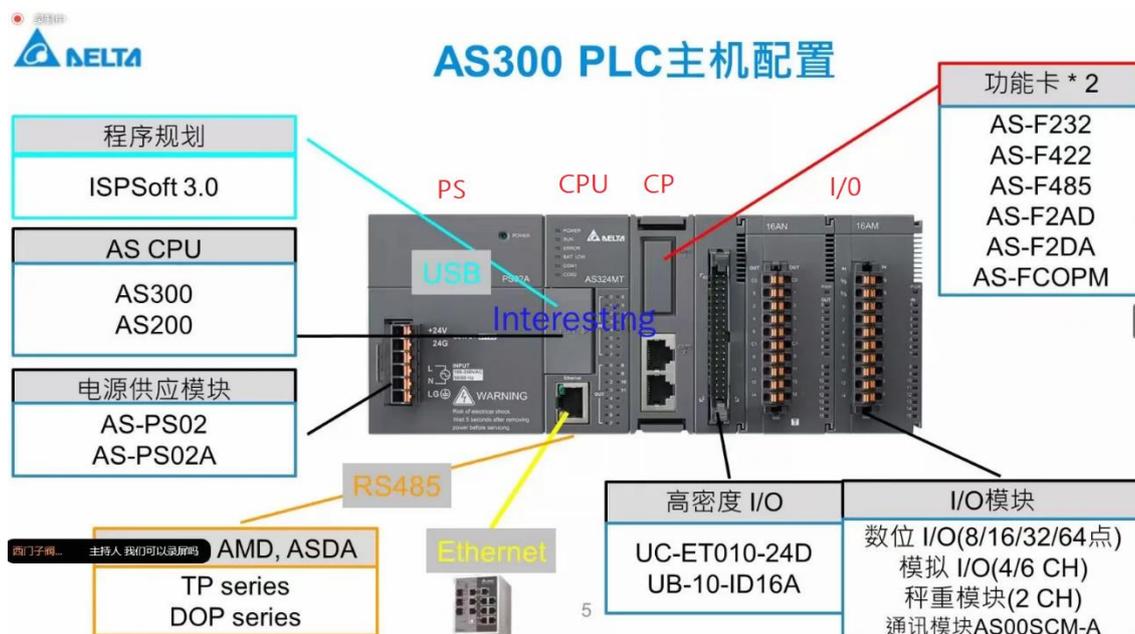


Рисунок 42 – Модульное подключение

Управление приводами вентиляторов охлаждения будет осуществляться путем отправки информационных телеграмм по интерфейсу CANOpen, для этого к модулю центрального процессора необходимо дополнительно подключить коммуникационный модуль AS00SCM-A и плату расширения AS-FCOPM, как показано на рисунке 43 [19].



Рисунок 43 – Подключение платы расширения AS-FC0PM

В качестве инструмента удаленного мониторинга и контроля будет использована панель оператора DOP-107WV от фирмы Delta, представленная на рисунке 44.



Рисунок 44 – Панель оператора DOP-107WV

Для контроля температуры внутри защитного корпуса сухого трансформатора будет использован датчик температуры PT100, представленный на рисунке 45.



Рисунок 45 – Датчик температуры PT100

Исходя из того, что в стандартной комплектации PLC AS320T-B не имеет встроенных аналоговых каналов I/O, необходимо было использовать модуль AI или дополнительную плату процессорного модуля, представленные на рисунке 46.



Рисунок 46 – Расширение AI для ПЛК серии AS300

Руководствуясь вышеперечисленным, была составлена топология системы управления, представленная на рисунке 47.

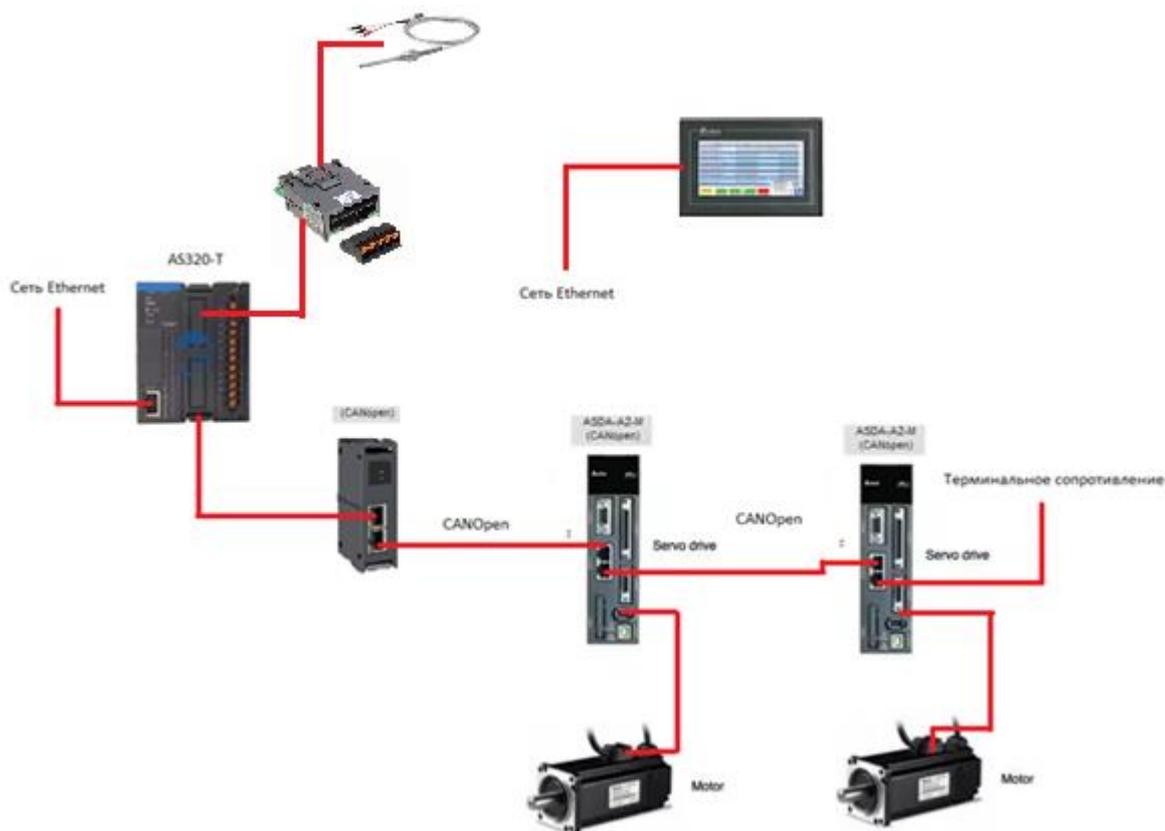


Рисунок 47 – Топология системы управления

Как было сказано выше, управление частотным приводом ASDA-A2 при помощи программируемого логического контроллера AS320-T фирмы Delta по протоколу CANOpen. Для настройки связи и разработки программного кода со стороны контроллера использовалась среда программирования ISPSOFT V 3.19 [20]. На рисунке 48 представлена схема подключения привода ASDA-A2 при управлении по CANOpen.

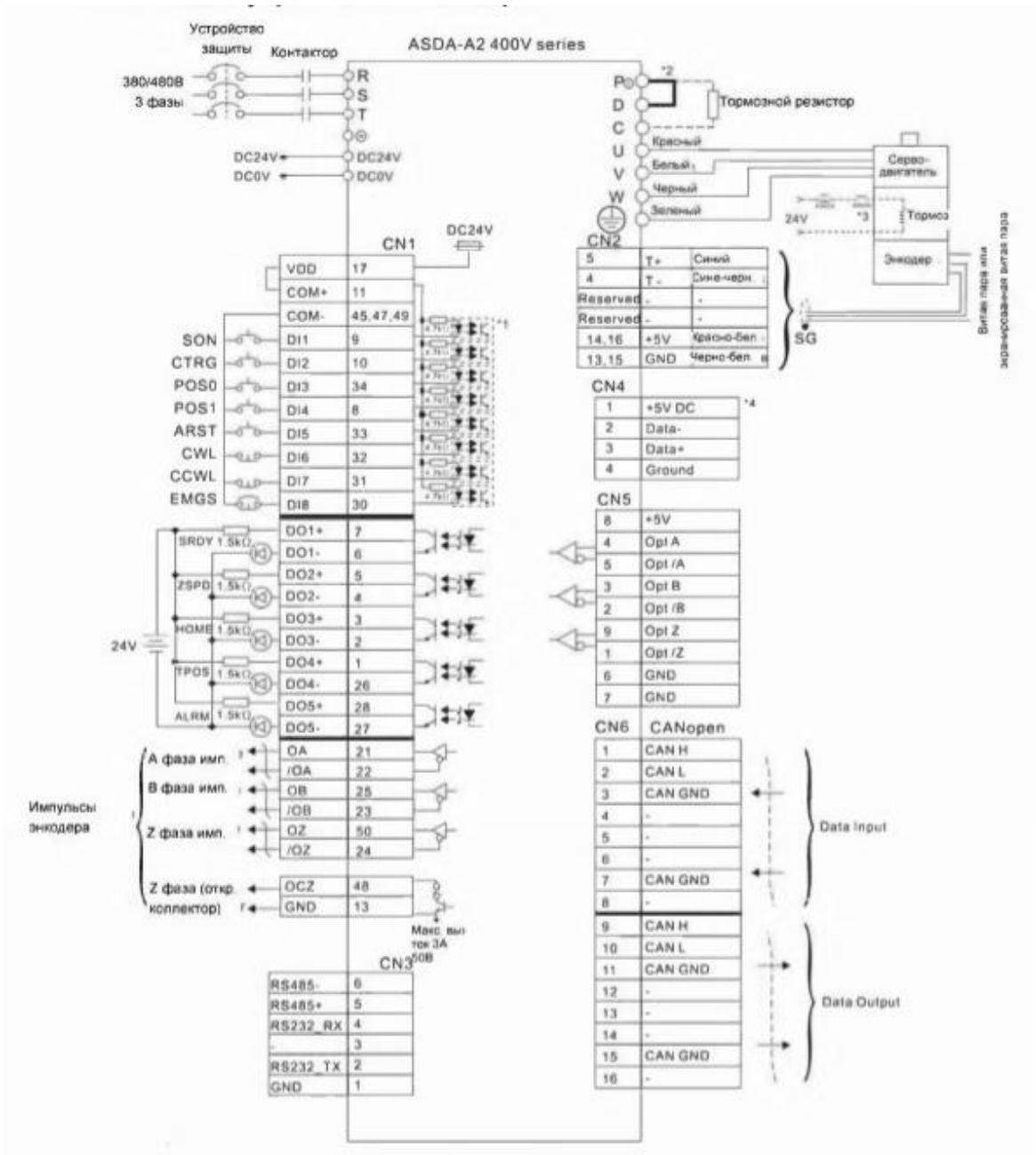


Рисунок 48 – Подключение ASDA-A2 при управлении по CANOpen

На рисунке 49 представлена итоговая схема электрическая принципиальная подключения привода вентиляторов охлаждения.



Полная электрическая принципиальная схема представлена в сопроводительных плакатах к данной пояснительной записке, а перечень элементов к схеме электрической принципиальной представлен в приложении А.

В качестве режима управления по CANOpen был выбран режим позиционирования по скорости. На рисунке 51 представлены параметры, подлежащие настройке под режим позиционирования по скорости.

- ① Set **【Mode of operations:6060h】** to profile velocity mode(3).
- ② Set **【Controlword:6040h】** to servo on drive and make motor work.  
(After drive switch to servo-on, internal velocity command will be reset and OD-60FFh will be cleared.)
- ③ Set **【Profile acceleration:6083h】** to plan acceleration slope. (millisecond from 0rpm to 3000rpm)
- ④ Set **【Profile deceleration:6084h】** to plan deceleration slope. (millisecond from 0rpm to 3000rpm)
- ⑤ Set **【Target velocity:60FFh】** . The unit of Target velocity is 0.1rpm.  
(If drive already servo-on, the drive will work immediately while receiving velocity command. OD-60FFh will be cleared to zero if OD-6060h[Mode] changed, Servo-Off or Quick-Stop is activated.)
- ⑥ Query **【Statusword:6041h】** to get drive status.

#### Рисунок 51 – Параметры, подлежащие настройке

На рисунке 52 представлена полная структура управляющей телеграммы для режима позиционирования по скорости CANOpen.

Index	Name	Type	Attr.
6040 <sub>h</sub>	Controlword	UNSIGNED16	RW
6041 <sub>h</sub>	Statusword	UNSIGNED16	RO
6060 <sub>h</sub>	Modes of operation	INTEGER8	RW
6061 <sub>h</sub>	Modes of operation display	INTEGER8	RO
606B <sub>h</sub>	Velocity demand value	INTEGER32	RO
606C <sub>h</sub>	Velocity actual value	INTEGER32	RO

Index	Name	Type	Attr.
606D <sub>h</sub>	Velocity window	UNSIGNED16	RW
606E <sub>h</sub>	Velocity window time	UNSIGNED16	RW
606F <sub>h</sub>	Velocity threshold	UNSIGNED16	RW
60FF <sub>h</sub>	Target velocity	INTEGER32	RW

Рисунок 52 – Структура управляющей телеграммы

Для настройки связи со стороны контроллера и формирования управляющей телеграммы воспользовались пакетом программного обеспечения ISPSoft. Произвели необходимые настройки Hardware configuration, добавив специализированную интерфейсную плату для работы по интерфейсу CANOpen и указали все необходимые нам характеристики и настройки ее работы, как показано на рисунках 53 и 54.

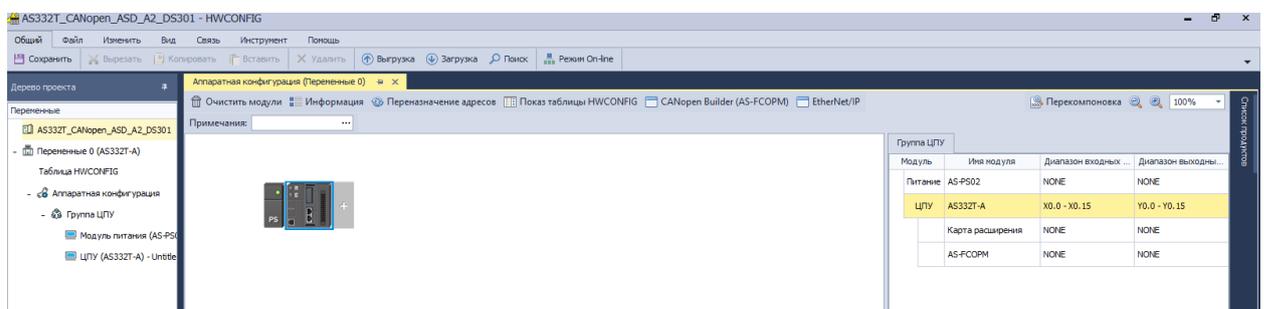


Рисунок 53 – Добавление платы AS-FCOPM в Hardware

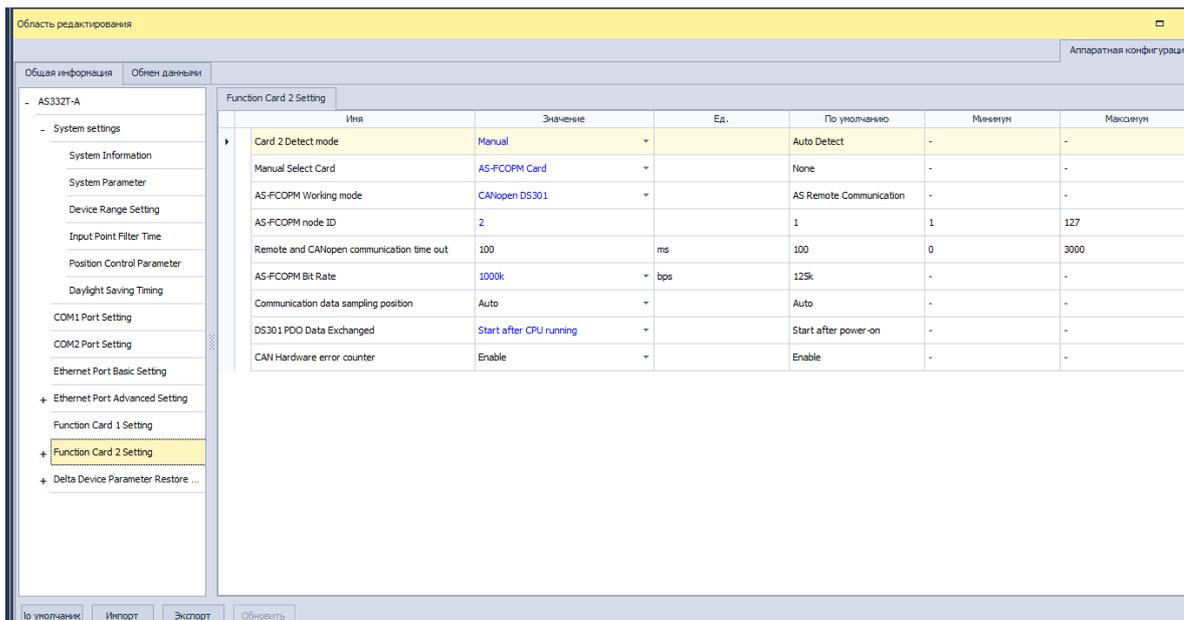


Рисунок 54 – Настройка платы AS-FCOPM

После проведения всех необходимых настроек и подготовительных процедур необходимо установить связь ПЛК и ПЧ при помощи стандартного вложенного инструмента программного пакета ISPSOft CANOpen Builder, как показано на рисунке 55.

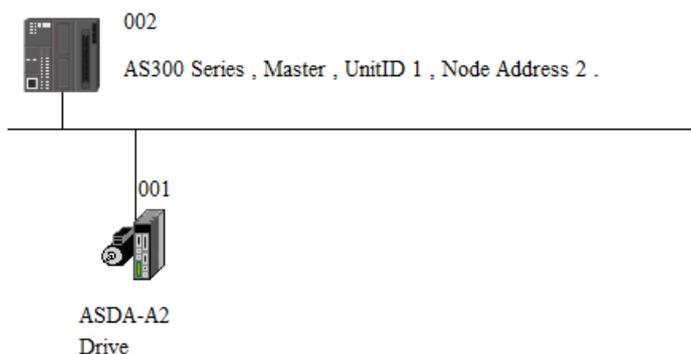


Рисунок 55 – Установка связи ПЧ-ПЛК в CANOpen Builder

Далее необходимо скомпоновать и настроить саму управляющую телеграмму слова управления и слова состояния и загрузить их структуру по целевым устройствам, как показано на рисунке 56.

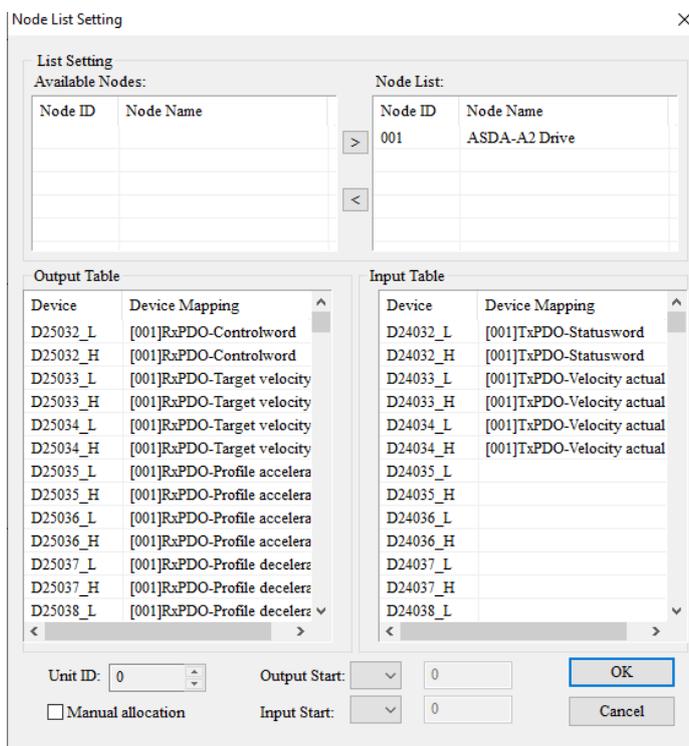


Рисунок 56 – Формирование структуры слов состояния и управления

После выполнения всех вышеперечисленных действий можно приступить к разработке управляющей программы для программируемого логического контроллера. На рисунке 57 представлен участок программного кода на языке LD, реализующий функцию передачи по телеграмме информации о режиме управления.

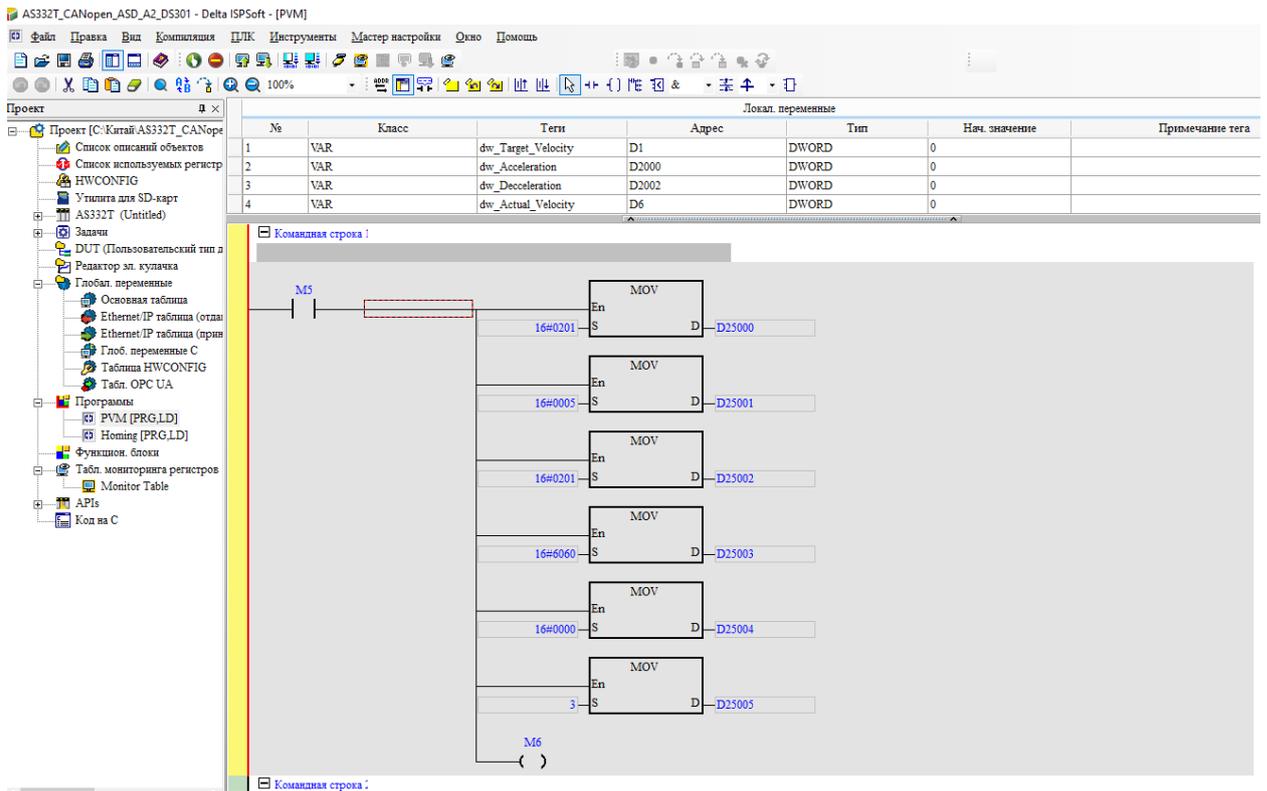


Рисунок 57 – Передача информации о режиме управления

На рисунке 58 представлен участок программного кода, реализующий функцию деблокировки, сброса ошибок и выключения сервопривода в зависимости от собранных условий.

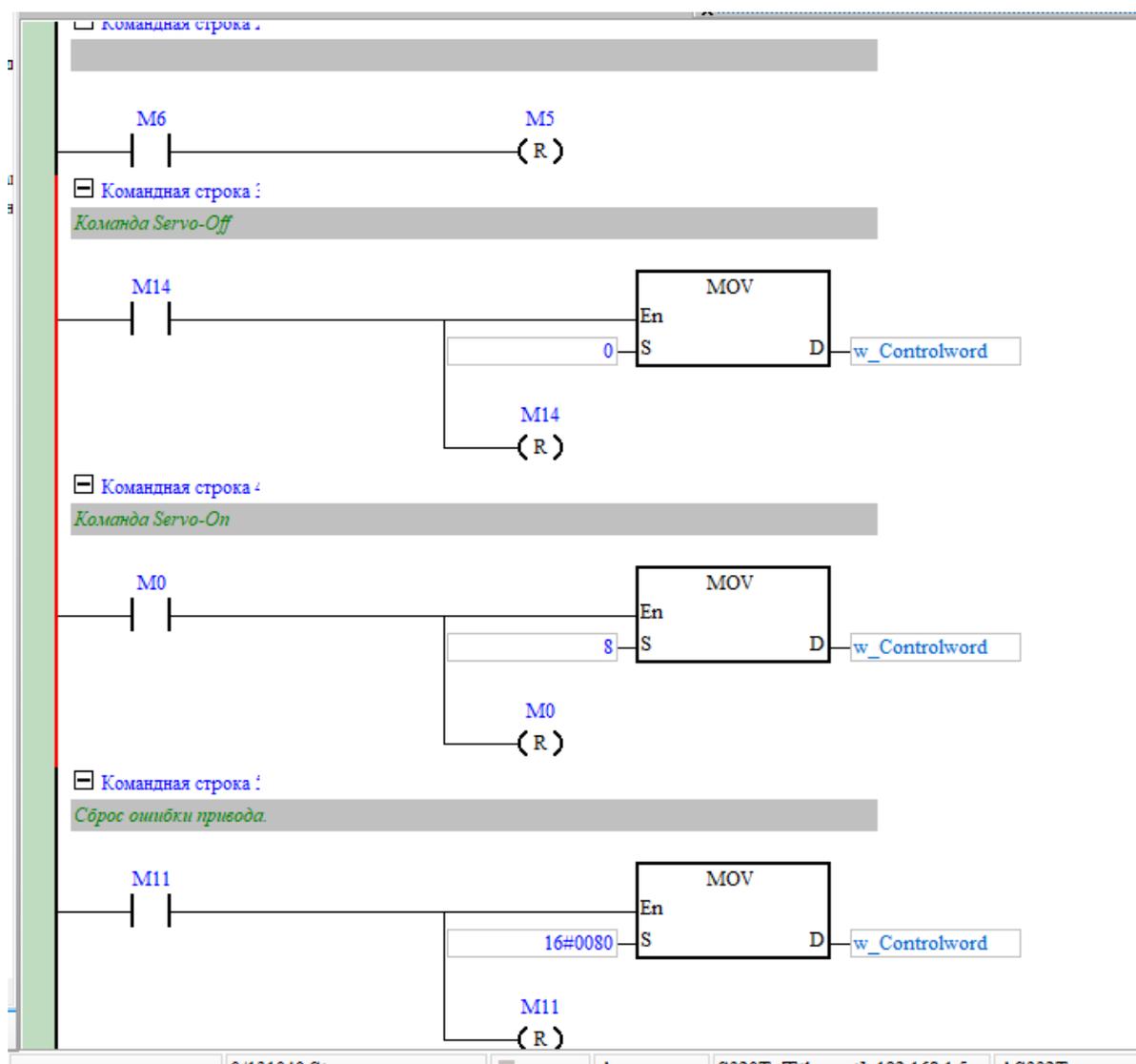


Рисунок 58 – Запись базовых функций

На рисунке 59 представлен участок программного кода, реализующий функцию передачи информации о рампе разгона-торможения и целевой скорости в привод.

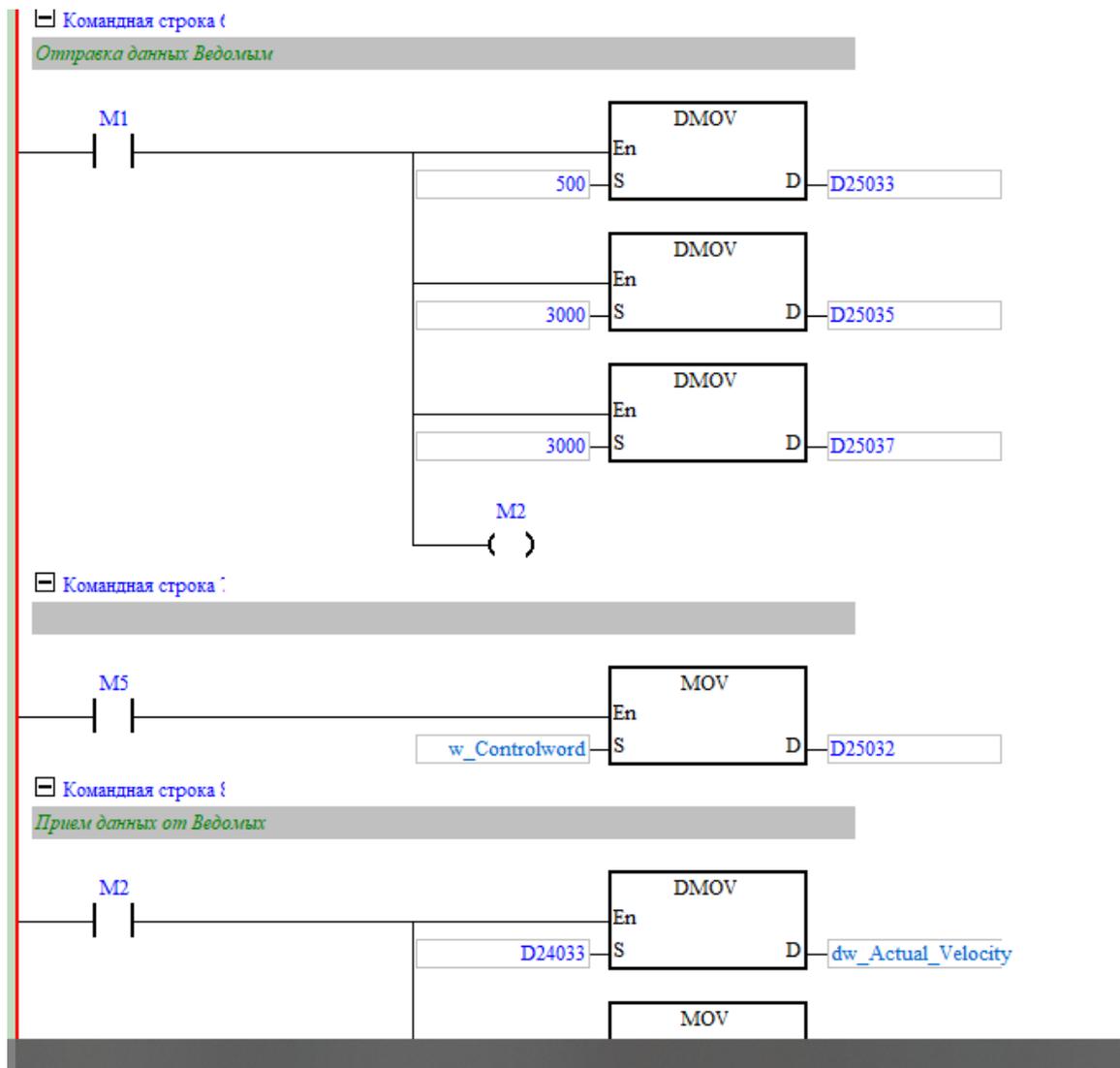


Рисунок 59 – Передача рабочих установок в ПЧ

На рисунке 60 представлено назначение выводов разъема платы расширения AI и пример двухпроводного подключения датчика PT100 для контроля температуры в рабочей зоне разрабатываемой системы.

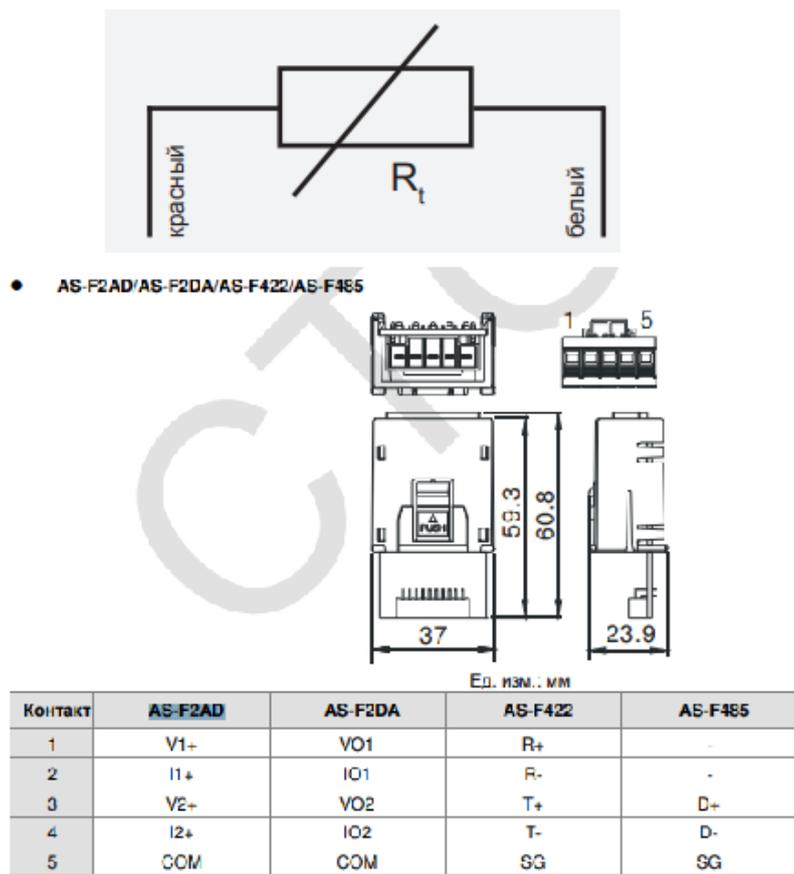


Рисунок 60 – Подключение датчика температуры

На рисунке 61 представлен функционал настройки платы расширения аналоговых входов в среде разработки ISPSoft.

Function Card 1 Setting						
	Имя	Значение	Ед.	По умолчанию	Минимум	Максимум
	Card 1 Detect mode	Manual		Auto Detect	-	-
	Manual Select Card	AS-F2AD Card		None	-	-
	F2AD Analog Input mode	0~10V		0~10V	-	-
	F2AD Sampling Time	3	ms	3	3	15
	F2AD Average Times	10		10	1	15
	F2AD Analog Input Warning	Disable		Disable	-	-

Рисунок 61 – Настройка параметров платы расширения

На рисунке 62 представлена окончательная аппаратная конфигурация контроллера с учетом всех составных модулей и введенных настроек.



Модуль	Имя модуля	Диапазон входных...	Диапазон выхонд...
Питание	AS-PS02	NONE	NONE
ЦПУ	AS320T-B	X0.0 - X0.7	Y0.0 - Y0.11
	AS-F2AD	NONE	NONE
	AS-FCOPM	NONE	NONE

Рисунок 62 – Аппаратная конфигурация контроллера

“Для регулирования температуры внутри рабочей зоны за счет изменения интенсивности принудительного обдува будет использован программный ПИД регулятор. представленный на рисунке 63. Пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор (ПИД) регулятор — устройство в управляющем контуре с обратной связью. Используется в системах автоматического управления для формирования управляющего сигнала с целью получения необходимых точности и качества переходного процесса. ПИД-регулятор формирует управляющий сигнал, являющийся суммой трёх слагаемых, первое из которых пропорционально разности входного сигнала и сигнала обратной связи (сигнал рассогласования), второе - интегралу сигнала рассогласования, третье - производной сигнала рассогласования” [18].

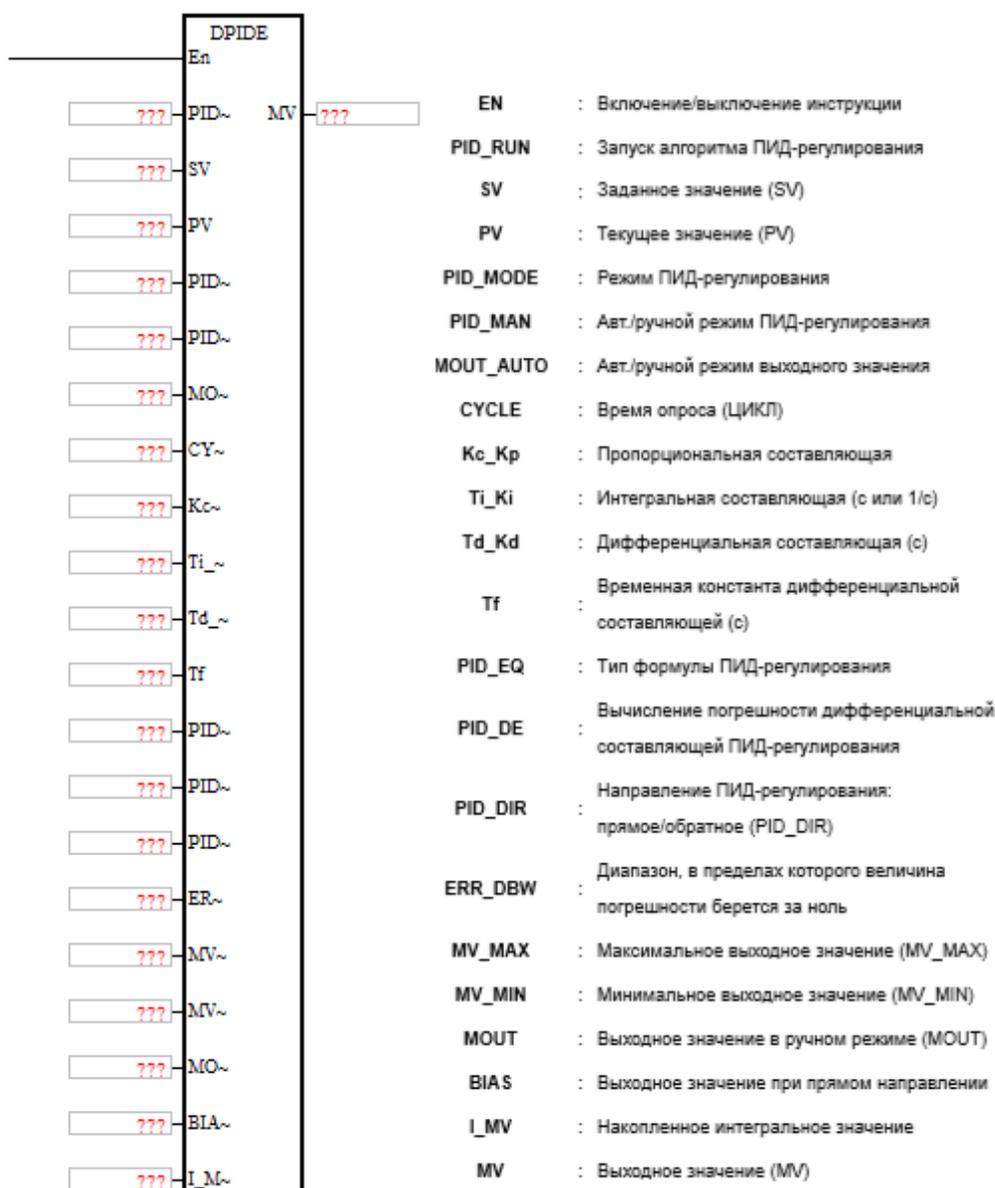
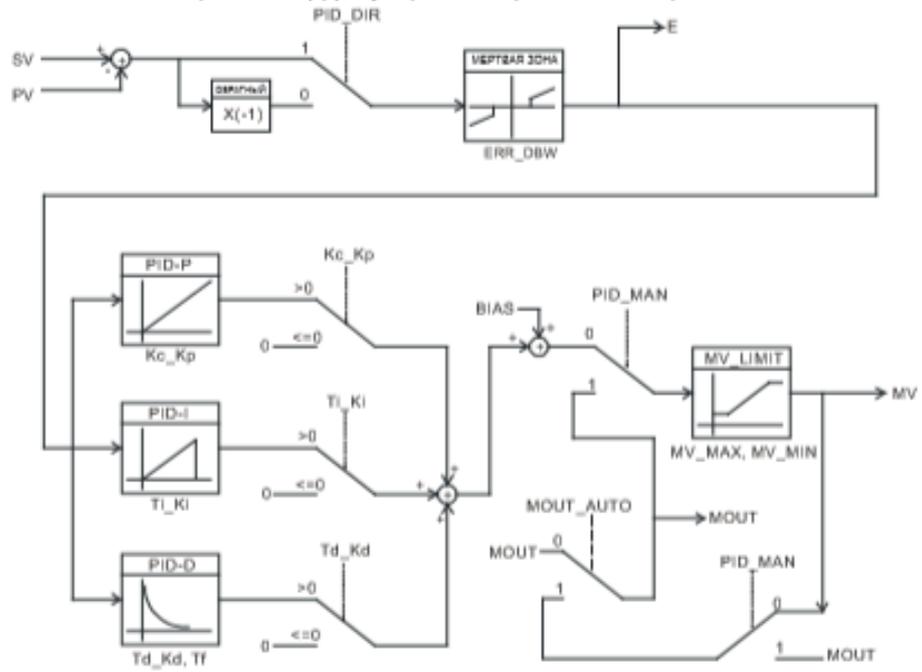


Рисунок 63 – Программный ПИД регулятор

Задача данного программного блока при помощи математических функций и расчетов вывести состояние температуры в контролируемой области на значение уставки за счет изменения величины управляющего воздействия. На рисунке 64 представлена структура программного ПИД регулятора delta, в зависимости от выбранного режима работы и прочих выбранных параметров.

Блок схема алгоритма ПИД-регулирования (независимый)



Блок схема алгоритма ПИД-регулирования (зависимый)

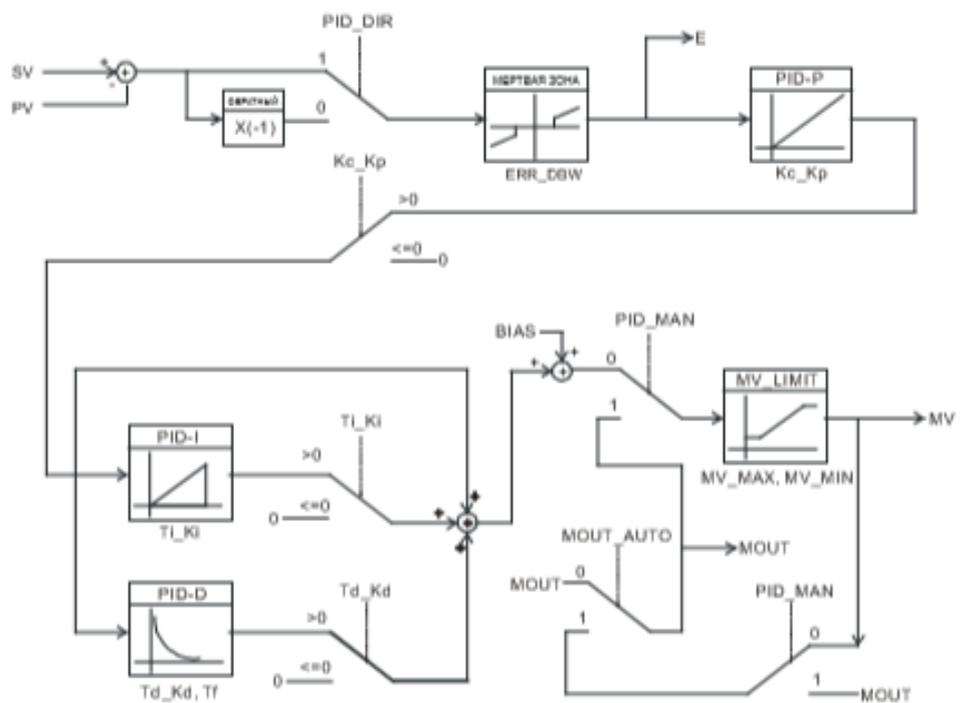


Рисунок 64 – Структура ПИД регулятора Delta

На рисунке 65 представлены вариации выходного управляющего воздействия программного ПИД регулятора Delta в зависимости от выбранных параметров.

- Независимая формула и производная E (PID\_EQ=False и PID\_DE=False)

$$MV = K_p E + Ki \int_0^t E dt + K_d * \frac{dE}{dt} + BLAS \quad E = SV - PV \quad \text{или} \quad E = PV - SV$$

»8

Раздел 6 Прикладные инструк

- Независимая формула и производная PV (PID\_EQ=False и PID\_DE=True)

$$MV = K_p E + Ki \int_0^t E dt - K_d * \frac{dPV}{dt} + BLAS \quad E = SV - PV$$

Или

$$MV = K_p E + Ki \int_0^t E dt + K_d * \frac{dPV}{dt} + BLAS \quad E = PV - SV$$

- Зависимая формула и производная E (PID\_EQ=True и PID\_DE=False)

$$MV = K_s \left[ E + \frac{1}{T_i} \int_0^t E dt + T_d * \frac{dE}{dt} \right] + BLAS \quad E = SV - PV \quad \text{или} \quad E = PV - SV$$

- Зависимая формула и производная PV (PID\_EQ=True и PID\_DE=True)

$$MV = K_s \left[ E + \frac{1}{T_i} \int_0^t E dt - T_d * \frac{dE}{dt} \right] + BLAS \quad E = SV - PV$$

Или

$$MV = K_s \left[ E + \frac{1}{T_i} \int_0^t E dt + T_d * \frac{dE}{dt} \right] + BLAS \quad E = PV - SV$$

Рисунок 65 – Выходное управляющее воздействие ПИД регулятора

На рисунке 66 представлен пример работы программного П регулятора блока DPIDE Delta с настроенным пропорциональным коэффициентом.

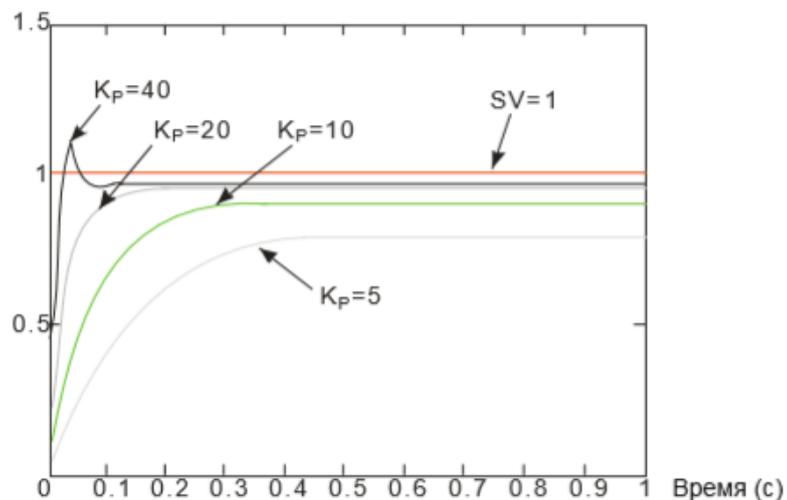


Рисунок 66 – Работа П регулятора

На рисунке 67 представлен пример работы ПИД регулятора блока DPIDE Delta.

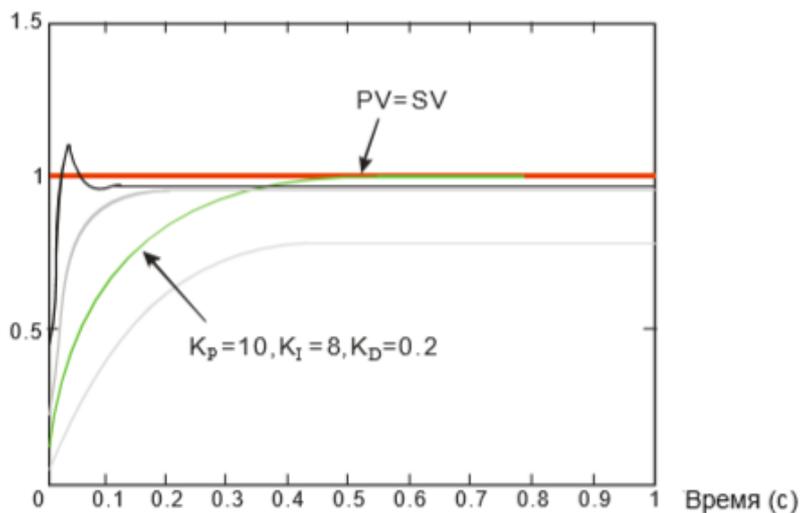


Рисунок 67 – Работа ПИД регулятора

Как видно из графиков, представленных выше программный блок DPIDE в режиме ПИД регулятора выводит контролируемый параметр на значение уставки значительно быстрее и без резких скачков значений, что обусловлено наличием всех трех составляющих, оказывающих немедленное, накопительное и временное воздействие на параметр.

Пропорциональная составляющая в П регуляторе, рассматриваемая в первом случае схожа по принципу работы с любой релейной логической системой и имеет характерный гистерезис. При достижении значения уставки управляющее воздействие отключается, а при превышении включается, что может приводить к скачкам и провалам на графике контролируемого параметра ввиду физических процессов нагрева и охлаждения.

Окончательный выбор вида регулирования и настройка программного блока DPIDE должны производиться при пуско-наладке оборудования в конкретном производственном помещении. Экспериментально может выявиться необоснованное использование ПИД регулирования ввиду того, что для системы охлаждения сухого трансформатора скачки регулируемого параметра, особенно в сторону уменьшения не критичны при условии наличия постоянного пассивного обдува.

#### Выводы по разделу

В данном разделе была разработана структура автоматизированной СД системы охлаждения силового трансформатора, проведен подбор и настройка компонентов системы управления и приводной системы. Разработаны и реализованы необходимые программные связи и алгоритмы управления. Разработана необходимая электротехническая документация.

### 3 Разработка функциональных экранов HMI

Для разработки функциональных экранов HMI, предоставляющих возможность удаленного контроля и мониторинга работы системы охлаждения использовалась среда разработки DOPSoft V 4.00.16. Рабочая среда программы DOPSoft представлена на рисунке 68.

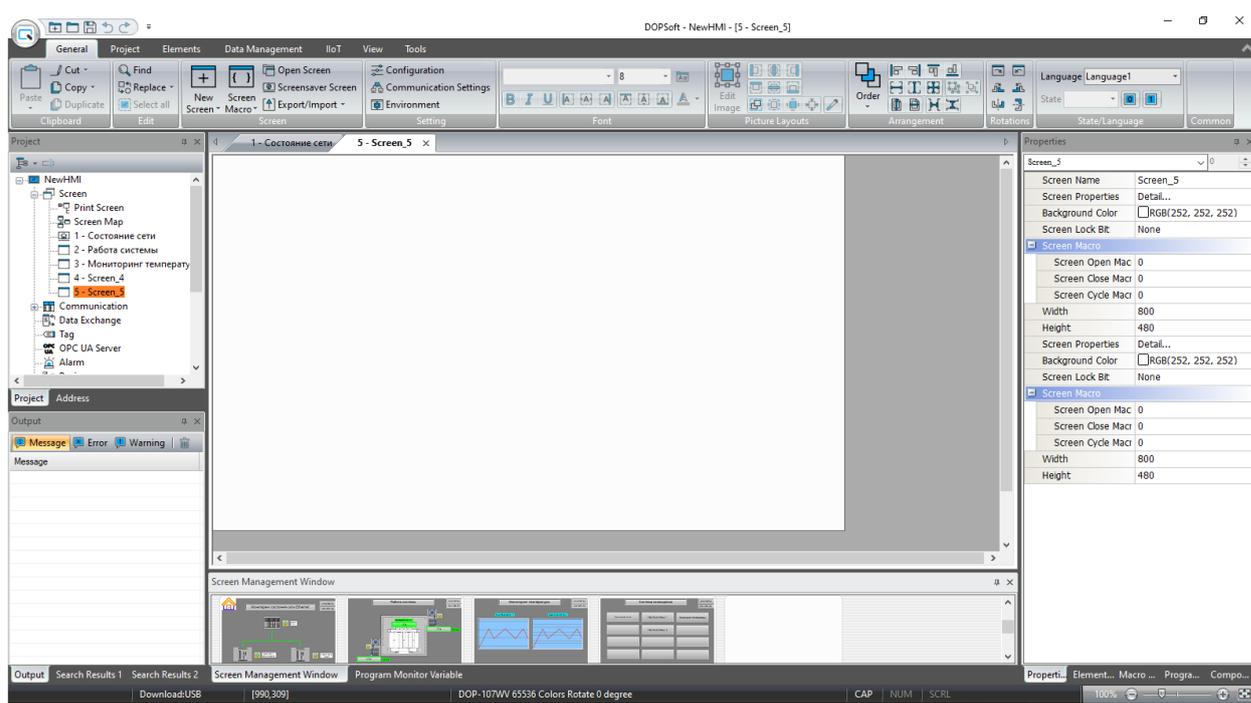


Рисунок 68 – Рабочая среда DOPSoft V 4.00.16.

Для настройки коммуникации панели оператора и программируемого логического контроллера необходимо провести параметрирование сети Ethernet и поместить все устройства в общую подсеть, как показано на рисунках 69 и 70.

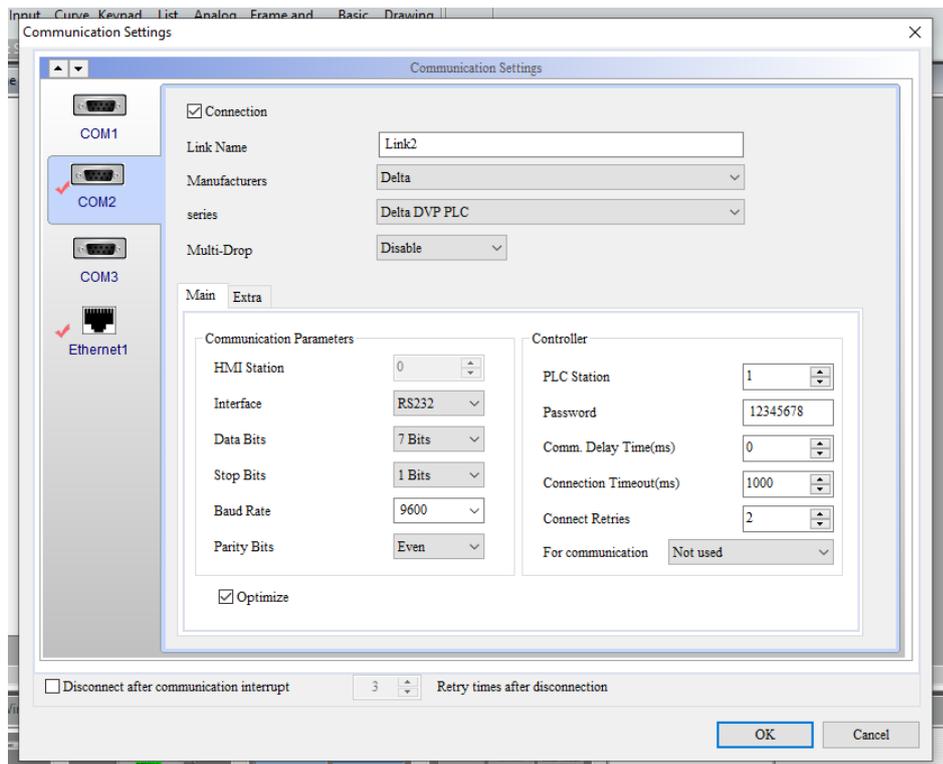


Рисунок 69 – Настройка коммуникации и сети RS232

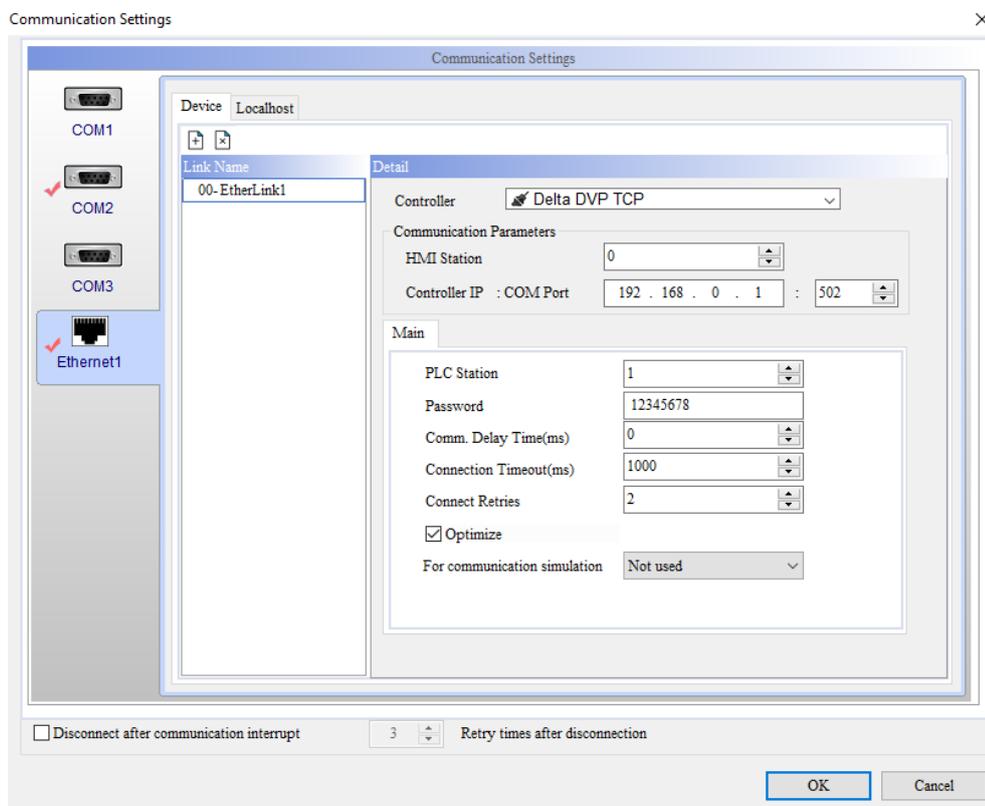
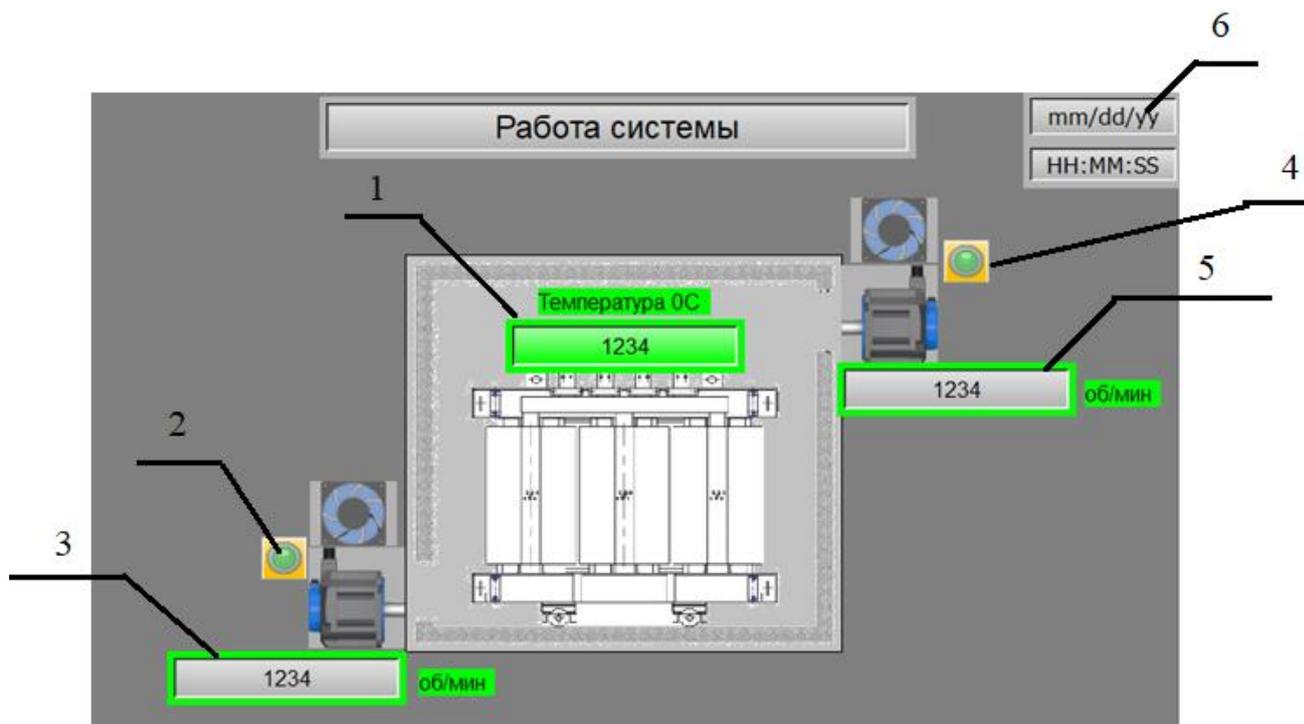


Рисунок 70 – Настройка коммуникации и сети Ethernet

Основной задачей разработки функциональных экранов человеко-машинного интерфейса является обеспечение возможности удаленного контроля и мониторинга состояния работы системы, так, к примеру, был разработан экран, визуализирующий работу основных узлов системы, представленный на рисунке 71.



1 - температура в рабочей зоне; 2 – состояние привода А; 3 – обороты двигателя А; 4 – состояние привода Б; 5 – обороты двигателя Б; 6 – дата и время.

Рисунок 71 – Работа системы

На представленном выше экране отображается состояние приводной системы, наличие ошибок, обороты двигателя и текущее значение температуры внутри рабочей зоны.

На рисунке 72 представлен экран мониторинга состояния сети Ethernet.

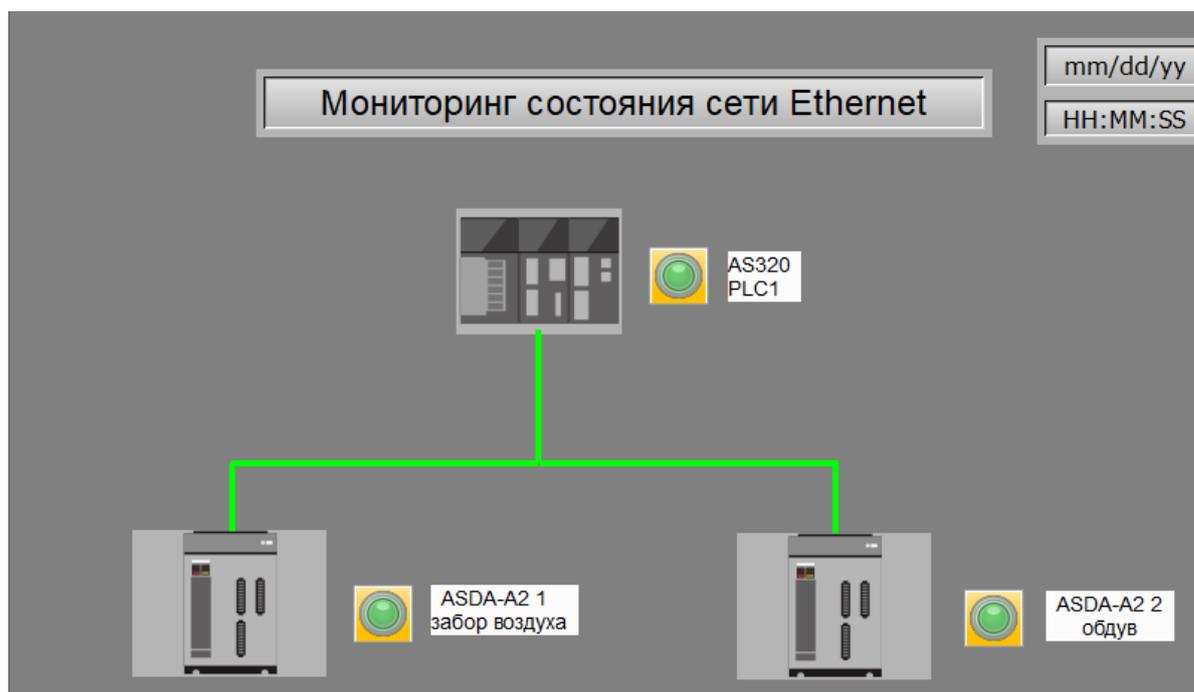


Рисунок 72 – Мониторинг состояния сети Ethernet

На рисунке 73 представлено функциональное окно настройки рабочих параметров системы.

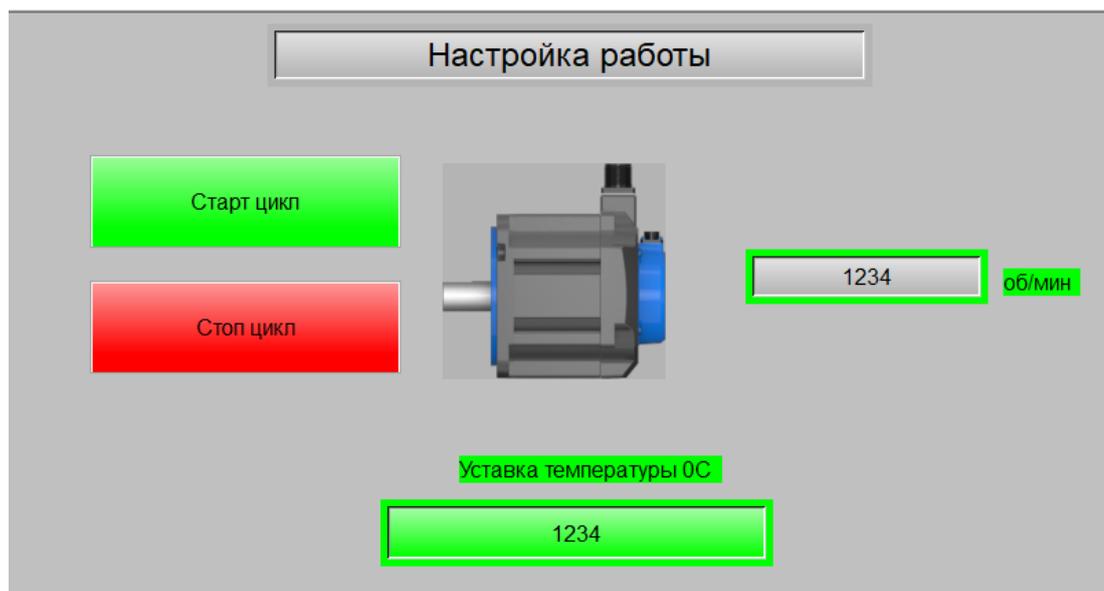


Рисунок 73 – Окно настройки рабочих параметров

Принцип работы автоматизированной системы заключается в следующем, в систему вводится уставка температуры, которая должна поддерживаться в рабочей зоне в штатном режиме, система управления, анализируя информацию, полученную с датчика температуры, регулирует обороты вентиляторов обдува, тем самым, за счет ПИД регулирования выводит реальную температуру в зону программной уставки. Полный листинг управляющей программы представлен в приложении Б. На рисунке 74 представлена упрощенная блок-схема алгоритма работы автоматизированной СД системы охлаждения силового трансформатора.

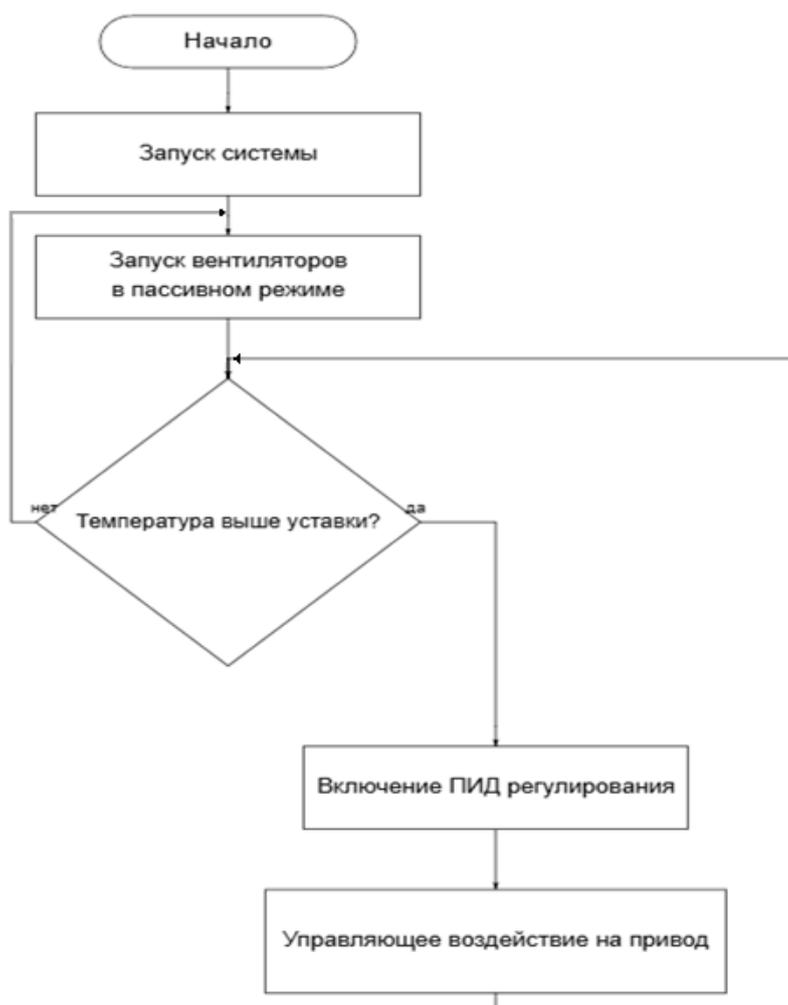


Рисунок 74 – Упрощенная блок-схема алгоритма работы системы

На рисунке 75 представлено упрощенное моделирование работы системы программного ПИД регулирования.

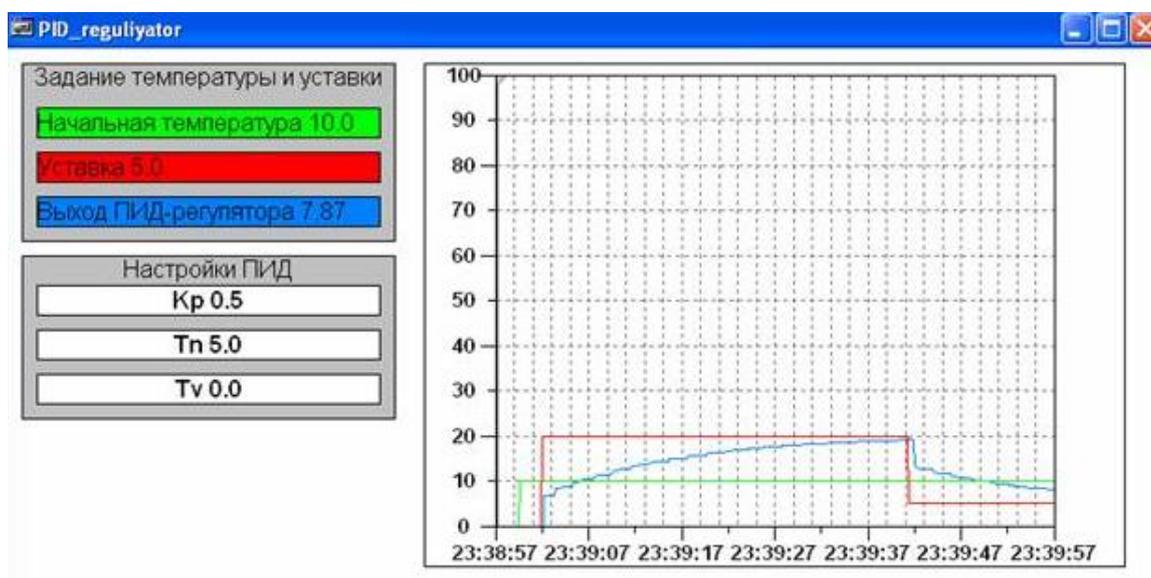


Рисунок 75 – Упрощенное моделирование работы системы программного ПИД регулирования

#### Выводы по разделу

В данном разделе был представлен обобщенный алгоритм работы автоматизированной СД системы охлаждения силового трансформатора, проверен принцип работы программного ПИД регулирования, а также представлены некоторые разработанные функциональные экраны НМІ.

## Заключение

В ходе выполнения данной выпускной квалификационной работы были выполнены все поставленные задачи и достигнута обозначенная во введении цель. Была разработана автоматизированная СД система охлаждения силового трансформатора.

Были изучены основные положения касательно силовых трансформаторов, их классификации, назначении и различиях.

Была изучена информация о специфике работы и классификации систем охлаждения, а также навесного оборудования силовых трансформаторов.

Был представлен полный пакет электротехнической документации для дальнейшей сборки, программирования и эксплуатации автоматизированной системы.

Была разработана структура автоматизированной СД системы охлаждения силового трансформатора, проведен подбор и настройка компонентов системы управления и приводной системы. Разработаны и реализованы необходимые программные связи и алгоритмы управления. Разработана необходимая электротехническая документация.

Для автоматизированной СД системы охлаждения были разработаны все необходимые электронные и электрические связи, управляющая программа, включающая в себя использование программного блока ПИД регулирования.

Для обеспечения возможности удаленного контроля и мониторинга работы системы охлаждения были разработаны функциональные экраны человеко-машинного интерфейса.

Наработки, полученные в ходе выполнения данной выпускной квалификационной работы, можно использовать для реализации и внедрения систем охлаждения силовых трансформаторов на понижающих подстанциях или в корпусах промышленных помещений.

## Список используемой литературы

1. Атапин, В. Н. (2018). Автоматизация процессов управления и диагностики силовых трансформаторов. Москва: Энергоатомиздат. — 304 с.
2. Глушков, С. А., и Лапшина, М. В. (2019). \*Эффективность автоматизированных систем управления охлаждением трансформаторов\*. Вестник Технической Академии, 8(2), 120-126.
3. «Документация и софт для сервоприводов Delta Electronics ASDA-A2» // ГК СТОИК [Электронный ресурс]. URL: <https://deltronics.ru/catalog/servoprirodyi/asd-a2/dokumentacziya-i-soft/> (дата обращения: 27.02.2025).
4. Джасеб, Р. А., Асмаджанов, И. Р. (2020). \*Современные подходы к автоматизации систем охлаждения трансформаторов. Известия высших учебных заведений. Электрические станции, 52(3), 45-50.
5. Максимова, Н. И. (2023). Автоматизация управления температурным режимом трансформаторов\*. Теплотехника и энергетика, 75(2), 112-119.
6. «Охлаждение сухого трансформатора» // ЭПИ [Электронный ресурс]. URL: <https://epatrade.ru/articles/okhlazhdenie-sukhogo-transformatory/> (дата обращения: 06.01.2025).
7. «Охлаждение сухого трансформатора» // ЭПИ [Электронный ресурс]. URL: <https://epatrade.ru/articles/okhlazhdenie-sukhogo-transformatory/> (дата обращения: 19.01.2025).
8. «Охлаждение трансформаторов» // НОМЭК [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nomek.ru/node/253> (дата обращения: 11.02.2025).
9. «Промышленная автоматизаций Delta electronics» // Delta Electronics [Электронный ресурс]. URL: <https://www.delta-electronics.info/> (дата обращения: 16.02.2025).
10. Смирнова, Е. В., и Покровский, Н. В. (2022). Современные технологии систем охлаждения силовых трансформаторов, 15(4), 64-70.

11. «Сервоприводы и редукторы» // OPTIMUS DRIVE [Электронный ресурс]. URL: <https://optimusdrive.ru/catalog/servoprivodyi/> (дата обращения: 01.03.2025).
12. «Системы охлаждения трансформаторов» // StudFiles [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/9898689/page:3/> (дата обращения: 16.01.2025).
13. «Системы и виды охлаждения силовых трансформаторов» // ЭнергоТранс [Электронный ресурс]. URL: <http://clck.ru/3Li7uS> (дата обращения: 14.01.2025).
14. «ASDA-Soft V6.5.0.0» // Delta | Download Center [Электронный ресурс]. URL: [https://downloadcenter.deltaww.com/en-US/DownloadCenter?v=1&q=ASDA-Soft&sort\\_expr=cdate&sort\\_dir=DESC](https://downloadcenter.deltaww.com/en-US/DownloadCenter?v=1&q=ASDA-Soft&sort_expr=cdate&sort_dir=DESC) (дата обращения: 17.03.2025).
15. «ASDA-A2 Servo drive for general use» // Delta Electronics [Электронный ресурс]. URL: <https://goo.su/rtZqJ5> (дата обращения: 08.03.2025).
16. «Brands» // Drive system group [Электронный ресурс]. URL: <https://drivesystemsgroup.com/> (дата обращения: 16.02.2025).
17. «Delta ASDA-A2 User Manual» // Delta AS Drives [Электронный ресурс]. URL: <https://deltaacdrives.com/Delta-ASDA-A2-User-Manual.pdf> (дата обращения: 28.03.2025).
18. «Products - PLC - Programmable Logic Controllers - Delta» // Delta Electronics [Электронный ресурс]. URL: <https://www.deltaww.com/en-US/products/PLC-Programmable-Logic-Controllers/ALL/> (дата обращения: 21.02.2025).
19. «Smart Energy Solution» // Delta Electronics [Электронный ресурс]. URL: <https://www.deltaww.com/> (дата обращения: 04.01.2025).
20. «台达高性能泛用型控制器AS 系列»//台达官网 [Электронный ресурс]. URL: <https://goo.su/Ut5aJD> (дата обращения: 06.03.2025).

## Приложение А

### Перечень элементов к схеме электрической принципиальной Автоматизированной СД системы охлаждения

Поз. обозначение	Наименование	Кол-во	Примечание
<u>Модули</u>			
A2	AS-PS02A Delta Блок питания AS, 220V, 48W	1	
A3	AS320T-B Процессорный модуль AS300	1	
A3.1	AS-FCOMP Модуль расширения CANopen	1	
A6	AS08AD-B Модуль расширения AI для контроллеров AS	1	
U6	ASD-A2-3043-M Преобразователь 3.0кВт 3x400В	1	
U22	DOP-112MX Панель оператора	1	
G1	DRF-24V480W3GBA Блок питания серии Forge-GT 3x380В	1	
<u>Мотory</u>			
M6	ECMA-J11330R4 Серводвигатель 3.0кВт, 3x400В, 3000об/мин	1	
<u>Резисторы</u>			
R1	RXLG400W40RJ Тормозной резистор 400Вт 40 Ом	1	
R2	Датчик температуры PT100 Терморезистор	1	
<u>Трансформаторы</u>			
T1	OCM 1-0,63 380/220 трансформатор 1-фазн 380v/220 AC	1	
<u>Контакты</u>			
K4	222130 Контакт NC1-3210Z 32A DC24В 1HD	1	
<u>Выключатели</u>			
F1-F3	12051DEK Выключатель автоматический однополюсный	3	
F10-F14	13151DEK Автоматический выключатель BA105-1P-006A-C	5	
SF1	11064DEK Автоматический выключатель BA101-2P-006A-C	1	
SF11	13175DEK Автоматический выключатель BA105-3P-006A-C	1	
<u>Переключатели и лампы</u>			
S4-S11,S1	SW2C-11 Кнопка SW2C-11 /R5MC101	9	
H1,H10,H11	R5LKL10 / OptDin FSL63-230AC-УХЛ3	3	
<b>25-110304.14/09.110.02 ПЗЗ</b>			
			Стадия    Масса    Масштаб
Изм. Колуч. Лист №зак. Подп. Дата			Автоматизированная СД система охлаждения
Разработал    Миченко И.М.			
Проверил    Прядилов А.В.			Лист    1    /    Листов    1
Т.контроль			
Н.контроль    Прядилов А.В.			ТГУ зр, Э/Идда-2102а
Утвердил    Шевцов А.А.			

Рисунок А.1 – Перечень элементов

## Приложение Б

### Листинг участка управляющей PLC программы

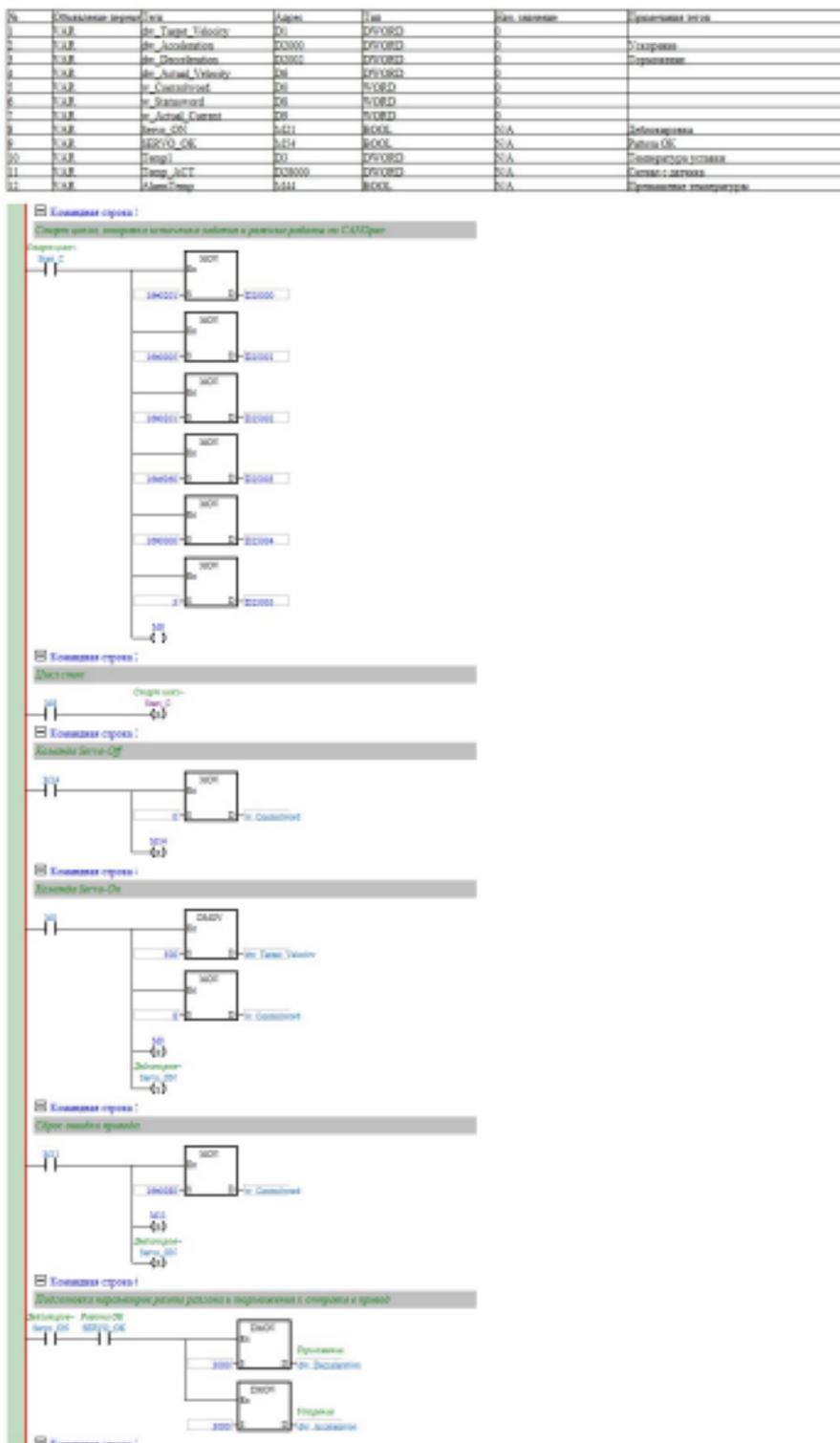


Рисунок Б.1 – Листинг управляющей PLC программы

