

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)

13.03.02. Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки/ специальности)

Электроснабжение

(направленность (профиль)/специализация)

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

на тему Автоматизация системы контроля состояния силового электрооборудования  
предприятия ООО «ВИП Универсал»

Обучающийся

К.С. Шокуров

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, Ю. В. Черненко

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

Тольятти 2023

## **Аннотация**

Выпускная квалификационная работа направлена на разработку мероприятий по контролю состояния силового электрооборудования на предприятии ООО «ВИР-Универсал».

В работе представлено описание технологического процесса цеха катафорезного покрытия. Приведен перечень оборудования, составлена схема ЭСН, произведен расчет кабельных линий и автоматов защиты, системы внутреннего освещения цеха.

Определены условия для разработки и внедрения автоматизации системы контроля состояния силового электрооборудования.

Структура бакалаврской работы включает пояснительную записку, в которой представлено введение, три раздела, заключение и список используемой литературы, а также графическую часть, выполненную на шести листах формата А1.

## Содержание

Введение.....	4
1 Автоматизированная система управления технологическим процессом .....	5
1.1 Понятие и функции АСУТП.....	5
1.2 Характеристика технологического процесса предприятия ООО «ВИП Универсал». Перечень электрооборудования.....	6
2 Защита электрических сетей и электроприемников напряжением до 1 кВ. Расчет токов КЗ в сетях напряжением до 1 кВ .....	12
2.1 Расчет и выбор автомата защиты 1SF (линия с группой ЭД).....	12
2.2 Расчет и выбор автоматов защиты SF1 (линия с одним ЭД) .....	15
2.3. Выбор тепловой защиты и магнитного пускателя для ЭД-1 .....	17
2.4 Расчет и проверка кабельных линий КТП – РП-4, РП-4 – ЭД-1.....	17
2.5 Расчет токов короткого замыкания.....	22
2.6 Расчет защитного заземления.....	34
3 Разработка АСУ для предприятия ООО «ВИП Универсал» .....	39
3.1 Неисправности и методы контроля состояния силового электрооборудования .....	39
3.2 Технологическая защита трансформатора .....	40
3.3. Автоматический ввод резерва .....	41
3.4 Защита насосов от «сухого хода» .....	42
3.5 Контроль параметров электродвигателей .....	43
Заключение .....	48
Список используемой литературы .....	49

## Введение

В момент становления индустриального общества произошел скачок машинного производства, где отличительной чертой является производственное оборудование, участвующее на всех этапах технологического процесса.

Применение машин, в качестве основного орудия труда, требовало подготовки новых профессиональных кадров – слесарей-ремонтников, электромонтеров и т.д. В ходе научно-технологического прогресса отмечается рост автоматизации труда на производстве – появляются первые контроллеры, цифровые и интегральные микросхемы. Новым витком в развитии промышленности стало применение автоматизированной системы управления (АСУ), что подразумевает участие человека (оператора) в ее работе. Оператор осуществляет регулярный контроль за системой управления, с чем эффективно ему помогают различные датчики (температуры, давления, скорости), контрольно-измерительные приборы (амперметры, вольтметры, ваттметры), операторские панели.

Целью бакалаврской работы является разработка автоматизации системы контроля состояния силового электрооборудования предприятия «ООО ВИП-Универсал». Объектом исследования выбран цех катафорезного покрытия. Проанализировав силовое оборудование, входящее в технологический процесс, будет составлена действующая схема электроснабжения цеха, произведен расчет кабельных линий и автоматов защиты, составлен перечень неисправностей электрооборудования с методами контроля и устранения.

Итогом выпускной квалификационной работы станет внедрение автоматизации системы контроля состояния силового электрооборудования, что позволит использовать метод неразрушающего контроля, где главной задачей является техническая диагностика без разбора и демонтажа оборудования.

# **1 Автоматизированная система управления технологическим процессом**

## **1.1 Понятие и функции АСУТП**

Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП) – это совокупность технических решений и программ для автоматизации технологического процесса, в котором участие персонала является периодическим. Если управление осуществляется обслуживающим персоналом, то его называют ручным.

В современное время используется огромное количество АСУ и предназначены они для решения различных задач автоматизации:

- сигнализация,
- контроль,
- блокировка и защита,
- пуск и останов,
- управление.

К элементам сигнализации можно отнести световые и звуковые индикаторы, представленные сигнальными лампами и сиренами. Функцию измерения величин выполняют такие контрольные приборы, как датчики температуры, преобразователи давления, датчики влажности воздуха и т.д. Сравнением контролируемых величин занимаются программируемые контроллеры. За блокировку и защиту технологического оборудования отвечают согласованные элементы схемы управления, например, дополнительные контакты на магнитном пускателе, реле контроля и последовательности фаз. Пуск, останов и реверс приводов – неотъемлемая часть технологического процесса, реализуемая с помощью магнитных пускателей и программируемых частотных преобразователей. Комплексное управление процессом, как правило, выполнено в виде диспетчерского пульта.

В системе автоматизации производства можно выделить три основных уровня [13]:

- уровень 1 «Input/Output»,
- уровень 2 «Control»,
- уровень 3 «SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition».

Совместная работа датчиков и анализаторов, осуществляющих первичный сбор данных, подконтрольна системе контрольно-измерительных приборов с обратной связью, чья история изменений режимов работы технологического процесса предоставляется на пульт управления.

В рамках производства ООО «ВИП-Универсал», управление процессами имеет более простые задачи – контроль и поддержание заданной величины, извещение о состоянии процессов, что больше относится к системе автоматического регулирования (САР).

«Основным видом информации о состоянии объекта управления в АСУТП являются текущие значения технологических параметров, которые преобразуются автоматическими измерительными устройствами в сигналы измерительной информации» [5].

Для измерения и поддержания заданных температурных параметров, контроля значений давления используются многоканальный ПИД-регулятор ТРМ 148 ОВЕН и ПИД-регулятор ТРМ 10 [11]. В управлении электродвигателями участвует частотный преобразователь (ЧП) – поддержание заданного давления в системе водоподготовки, изменение скорости вращения конвейерной линии, регулировка напора в системе орошения агрегата подготовки поверхности.

## **1.2 Характеристика технологического процесса предприятия ООО «ВИП Универсал». Перечень электрооборудования**

Спецификой работы предприятия является катафорезное покрытие автомобильных деталей. Катафорез – это разновидность электрофореза, где

обрабатываемая деталь имеет отрицательный электрический заряд (-), при этом сама краска заряжена положительно (+).

Весь технологический процесс можно разделить на четыре этапа:

- подготовка поверхности деталей,
- нанесение защитного слоя грунта,
- промывка окрашенных деталей,
- камера полимеризации.

Агрегат подготовки поверхности (АПП) – первая стадия технологического процесса, на котором деталь очищается от загрязнений и обрабатывается химическим составом, для улучшения адгезии между металлом и раствором грунта. Установка имеет девять стадий подготовки, представленных в таблице 1.

Таблица 1 – Стадии агрегата подготовки поверхности

Номер стадии	Операция	Температура	Время обработки (с)	Состав моющего раствора
1	Обезжиривание	42-50 °С	60	Моющая добавка МД-09, ПАВ МДК-01
2	Обезжиривание	42-50 °С	120	Моющая добавка МД-09, ПАВ МДК-01
3	Промывка	Температура окружающей среды	60	Хозяйственная вода
4	Промывка	Температура окружающей среды	60	Хозяйственная вода
Номер стадии	Операция	Температура	Время обработки (с)	Состав моющего раствора
5	Активация	Температура окружающей среды	60	Деминерализованная вода + активатор ФАТ-01

Продолжение таблицы 1

6	Фосфатирование	45-53 °С	120	Дефекс ОР-01, Дефекс КР-02, 40% раствор нитрита натрия
7	Промывка	Температура окружающей среды	60	Деминерализованная вода
8	Промывка	Температура окружающей среды	60	Деминерализованная вода
9	Промывка	Температура окружающей среды	30	Деминерализованная вода

Способом обработки деталей выбрана система орошения, где жидкость под давлением подается через форсунки на обрабатываемую поверхность. Исполнительным механизмом на АПП выступает моноблочный фланцевый насос типа Ебага серии 3L. Центробежный насос выполнен из нержавеющей стали и имеет возможность извлечения ротора без отсоединения корпуса насоса от трубопровода для его обслуживания.

В управлении процессом покраски (толщиной слоя) задействован трехфазный тиристорный выпрямитель напряжения ТВН-3 [19]. Тиристорный выпрямитель напряжения служит для преобразования трехфазного переменного напряжения в постоянное. Имеет гальваническую развязку с сетью через трансформатор типа ТСЗ-40 380/242 В. На рисунке 1 представлена схема устройства, где за выпрямление напряжения отвечают три тиристорных блока, подключенных по схеме Ларионова. Регулировка напряжения на нагрузке осуществляется системой импульсно-фазового управления (СИФУ) путем подачи сигнала на управляющий электрод тиристора.

К клемме «минус» выпрямителя подключена медная шина, имеющая непосредственный контакт с окрашиваемым элементом, при этом «плюс» соединен через анодные ячейки с раствором грунта (рисунок 1). В момент полного погружения детали в ванну, происходит процесс окрашивания, где положительно заряженный грунт осаждается не только на поверхности, но и



проникает в структуру верхнего слоя металла отрицательно заряженной детали. Обязательным условием для «жизни» раствора грунта является его непрерывное перемешивание. Принудительная циркуляция осуществляется двумя центробежными погружными насосами марки ETANORM GPV/CPV (расход - 70 м<sup>3</sup>, напор – 30 м) в сборе с асинхронными двигателями серии KSB AL 160M/L-04-11 кВт.

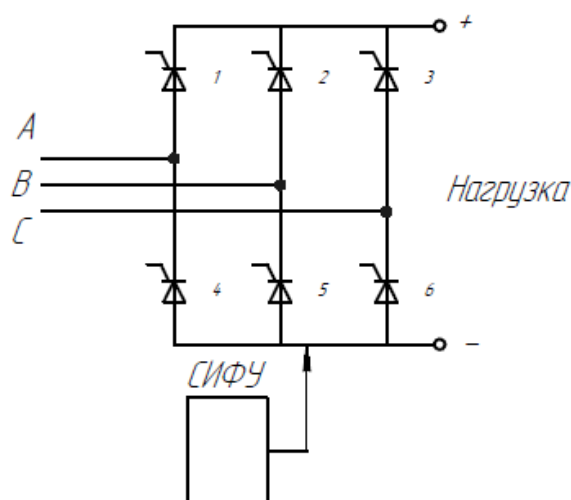


Рисунок 1 – Схема ТВН-3

Перемещаясь по конвейерной линии, подвеска попадает в зону промывки. Удаление излишков грунта с поверхности детали происходит в два этапа, где первой стадией выступает смывка ультрафильтратом - раствор деминерализованной воды и растворителя, обеспечивающий надежную очистку от остатков катафореза, а второй – орошение деминерализованной водой, смывающая остаточные соли с поверхности, для предотвращения подтеков. Система промывки выполнена аналогично стадиям АПП – очистка орошением с использованием моноблочных фланцевых насосов типа Ebara серии 3L.

Заключительным этапом технологического процесса является полимеризация защитного слоя. Процесс кристаллизации происходит в

термической камере при температуре не менее 180°C. За нагрев отвечает газовый генератор, состоящий из:

- пульт управления,
- газовая горелка,
- блок рециркуляции.

В перемещении деталей по всем этапам технологического процесса участвует грузонесущая конвейерная линия, состоящая из несущей цепи, кареток и съемных подвесок, приводимая в движение асинхронным двигателем типа АИР 100 2,2 кВт.

Перечень силового электрооборудования технологического процесса представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Перечень электрооборудования технологического процесса

Наименование ЭД	Количество	$P_n$ , кВт	$U_n$ , В	$\cos \varphi$	$\eta$ , %
АПП от РП-4					
Ebara 50-160/7,5	4	8	380	0,93	90,8
Ebara 65-160/9,2	3	10		0,92	90,9
Ebara 50-160/5,5	1	6		0,9	90,4
Ebara 40-160/3	1	3		0,78	87
Ebara 32-160/1,5	1	1,5		0,77	84,6
Циркуляция ванны грунта от РП-3 (АВР)					
KSB AL 160M/L-04-11	2	11	380	0,82	89,5
Зона промывки от РП-2					
Ebara 50-160/5,5	2	6	380	0,9	90,4
Ebara 40-160/3	2	3	380	0,78	87
Камера полимеризации от РП-1					

Продолжение таблицы 2

Наименование ЭД	Количество	$P_n$ , кВт	$U_n$ , В	$\cos \varphi$	$\eta$ , %
АИР 160	4	11	380	0,78	87,5
Привод конвейера от РП-3 (АВР)					
АИР 100	1	2,2	380	0,7	81

Вывод по разделу 1.

Применение средств автоматического регулирования значительно упрощает проведение технологического процесса и облегчает внесение изменений в его структуру, предотвращает аварийные режимы работы технологического оборудования, снижая тем самым финансовую нагрузку предприятия в будущем.

Состав технологического оборудования представлен асинхронными электродвигателями, надежная и безаварийная работа которых напрямую зависит от выбора автоматов защиты и кабельных линий. Система мониторинга параметров ЭД, как способ контроля состояния силового электрооборудования, представлена в соответствующем подразделе ВКР.

## 2 Защита электрических сетей и электроприемников напряжением до 1 кВ. Расчет токов КЗ в сетях напряжением до 1 кВ

Распределительный силовой пункт (РП-4) питается от шин низкого напряжения понизительной подстанции 6/0,4 кВ по кабелю с поливинилхлоридной изоляцией жил, проложенными открыто на улице. В производственном помещении монтаж произведен в лотке лестничного типа с фактической температурой окружающей среды +40°C. В лотке одновременно находятся еще четыре рабочих кабеля, питающие другие РП.

От РП 4 питаются электроприемники суммарной нагрузкой  $I_n = 130$  А. Электропроводка от РП-4 к ЭД-1 выполнена кабелем ВВГнг с поливинилхлоридной изоляцией жил. Проводка выполнена в перфорированном лотке в производственном цеху с температурой окружающей среды +30°C.

С учетом прокладки и допустимому нагреву определим сечение жил кабеля, рассчитаем токи и выберем автоматы защиты для ЭД.

### 2.1 Расчет и выбор автомата защиты 1SF (линия с группой ЭД)

Выбора аппарата защиты начнем с расчета тока в линии, где он будет применен. Составим расчетную схему электроснабжения, представленную на рисунке 2.

Автомат 1SF, являясь групповым, должен соответствовать следующему условию [18]

$$I_{н.а} \geq I_{н.р.} \geq 1,1 \cdot I_m, \quad (1)$$

где  $I_{н.а}$  - номинальный ток автомата, А;

$I_{н.р.}$  - номинальный ток расцепителя, А;

$I_m = I_n$  – максимальный ток в линии, А.

$$I_{н.р.} \geq 1,1 \cdot I_{н.},$$

$$I_{н.р.} \geq 1,1 \cdot 130 = 143 \text{ A.}$$

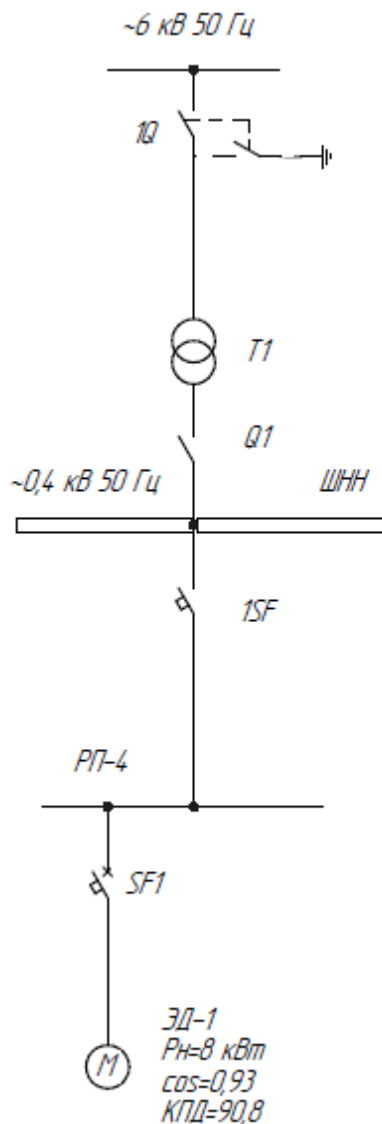


Рисунок 2 – Схема ЭЩН РП-7

Выбираем автоматический выключатель серии ЕКФ ВА-99С/250 [6] со следующими параметрами:

- $U_{н.а} = 690 \text{ В}$  - номинальное напряжение автомата, В;
- $I_{н.а} = 250 \text{ А}$  – номинальный ток автомата, А;
- $I_{н.р.} = 160 \text{ А}$  - номинальный ток расцепителя, А;

- $I_{y(п)} = 1,25I_{н.р}$  - ток срабатывания в зоне перегрузки, для всех выключателей, А;
- $I_{y(кз)} = 5I_{н.р}$  - ток короткого замыкания, при спокойном характере нагрузки, А;
- $I_{откл} = 45$  кА - отключающая способность автомата, кА.

Кратность отсечки автомата равна:

$$K_o \geq \frac{I_o}{I_{н.р.}}, \quad (2)$$

где  $K_o$  – кратность отсечки;

$I_o \geq 1,2I_{пик}$  – ток отсечки для линии с несколькими ЭД, А;

$I_{н.р.}$  – номинальный ток расцепителя, А;

$I_{пик}$  – пиковый ток, А, находится по формуле:

$$I_{пик} = I_{п.нб} + I_M - I_{н.нб}, \quad (3)$$

где  $I_{п.нб} = K_{п} \cdot I_{н.нб}$  – пусковой ток наибольшего по мощности ЭД, А;

$K_{п}$  – кратность пускового тока, принимается  $K_{п} = 6,5 \dots 7,5$  – для АД;  $K_{п} = 2 \dots 3$  – для СД и МПТ;

$I_M = I_H$  – максимальный ток на группу, А;

$I_{н.нб}$  – номинальный ток наибольшего в группе ЭД, А.

Рассчитаем номинальный ток наибольшего по мощности электродвигателя АПП (определяется по таблице 2):

$$I_{н.нб} = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{10}{1,73 \cdot 0,38 \cdot 0,92 \cdot 0,909} = 18,2 \text{ А} \quad (4)$$

Тогда пиковый ток будет равен:

$$I_{\text{пик}} = I_{\text{п.нб}} + I_{\text{м}} - I_{\text{н.нб}} = 7 \cdot 18,2 + 110 - 18,2 = 219,2 \text{ А}$$

Ток отсечки для 1SF:

$$I_0 \geq 1,2I_{\text{пик}} = 1,2 \cdot 219,2 = 263 \text{ А}$$

Подставим полученные значения в выражение и найдем кратность отсечки:

$$K_0 \geq \frac{I_0}{I_{\text{н.р.}}},$$
$$K_0 \geq \frac{263}{160} = 1,64.$$

Примем ток отсечки  $K_0 = 3$ .

По результатам расчетов определено минимальное значение номинального тока расцепителя  $I_{\text{н.р.}} = 143 \text{ А}$ . В качестве устройства защиты установим автоматический выключатель ЕКФ ВА-99С/250 с  $I_{\text{н.р.}} = 160 \text{ А}$ .

## 2.2 Расчет и выбор автоматов защиты SF1 (линия с одним ЭД)

Для расчета автомата защиты SF1 определим ток ЭД-1 [18] по формуле (4):

$$I_{\text{д}} = \frac{P_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{8}{1,73 \cdot 0,38 \cdot 0,93 \cdot 0,908} = 14,4 \text{ А}$$

Для линии с одним ЭД автомат выбирается согласно условию:

$$U_{\text{н.а}} \geq U_{\text{с}}; I_{\text{н.а}} \geq I_{\text{н.р}}; I_{\text{н.р}} \geq 1,25I_{\text{дл}}, \quad (5)$$

где  $U_{\text{н.а}}$  – номинальное напряжение автомата, В;

$U_{\text{с}}$  – напряжение сети, В;

- $I_{н.а}$  - номинальный ток автомата, А;
- $I_{н.р}$  – номинальный ток расцепителя, А;
- $I_{дл} = I_d$  – длительный ток в линии, А.

$$I_{н.р} \geq 1,25I_{дл},$$

$$I_{н.р} \geq 1,25 \cdot 14,4 = 18 \text{ А.}$$

Выбираем автоматический выключатель серии ЕКФ ВА-99С/100 [6] со следующими параметрами:

- $U_{н.а} = 690 \text{ В}$  - номинальное напряжение автомата, В;
- $I_{н.а} = 100 \text{ А}$  – номинальный ток автомата, А;
- $I_{н.р.} = 20 \text{ А}$  - номинальный ток расцепителя, А;
- $I_{у(п)} = 1,25I_{н.р}$  - ток срабатывания в зоне перегрузки, для всех выключателей, А;
- $I_{у(кз)} = 5I_{н.р}$  - ток короткого замыкания, при спокойном характере нагрузки, А;
- $I_{откл} = 25 \text{ кА}$  - отключающая способность автомата, кА.

Ток отсечки для линии с одним ЭД:

$$I_0 \geq 1,2I_{п}; I_0 \geq 1,2 \cdot K_{п} \cdot I_{д}, \quad (6)$$

где  $I_0$  – ток отсечки, А;

$I_{п}$  – пусковой ток, А;

$K_{п}$  – кратность пускового тока принимается  $K_{п} = 6,5 \dots 7,5$  – для АД;

$K_{п} = 2 \dots 3$  – для СД и МПТ.

$$I_0 \geq 1,2 \cdot 7 \cdot 18 = 151 \text{ А.}$$

Тогда кратность отсечки (3):



$$K_o \geq \frac{I_o}{I_{н.р.}} = \frac{151}{20} = 7,56.$$

Примем  $K_o = 8$ .

По результатам расчетов определено минимальное значение номинального тока расцепителя  $I_{н.р.} = 18$  А. В качестве устройства защиты установим автоматический выключатель ЕКФ ВА-99С/100 с  $I_{н.р.} = 20$  А.

### 2.3. Выбор тепловой защиты и магнитного пускателя для ЭД-1

Тепловое реле, в совместной работе с электромагнитным пускателем, обеспечивает защиту двигателя от превышения токов в сети питания.

Токи теплового реле  $I_{н.т.}$  выбираются по номинальному току электродвигателя  $I_d$  с условием [18]

$$I_{н.т.} \geq 1,25I_d, \tag{7}$$

$$I_d = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{8}{1,73 \cdot 0,38 \cdot 0,93 \cdot 0,908} = 14,4 \text{ А}$$

$$I_{н.т.} \geq 1,25I_d = 18 \text{ А.}$$

По результатам расчетов определено значение тока теплового реле. Выбираем электромагнитный пускатель серии КМЭ – 1810 с РТЭ – 1321 [6],  $I_{н.т.} = 18$  А.

### 2.4 Расчет и проверка кабельных линий КТП – РП-4, РП-4 – ЭД-1

При выборе сечения проводника [2] по условию нагрева сравнивают расчетный ток нагрузки и допустимый ток выбранного проводника, с учетом способа прокладки. При этом должно выполняться условие:

$$I_{\text{доп}} \geq \frac{I_p}{K_{\text{п}} \cdot k_2}, \quad (8)$$

где  $I_{\text{доп}}$  – допустимый ток выбранного проводника, А;

$I_p$  – расчетный ток нагрузки, А;

$K_{\text{п}}$  – поправочный коэффициент на условия прокладки проводника, зависящий от температуры окружающей среды;

$k_2 = 1$  – коэффициент прокладки в здании [1].

На участке линии с защитой от перегрузки проводники, выбранные по условию (8), должны согласовываться с аппаратами защиты [8]:

$$I_{\text{доп}} \geq k_2 \cdot K_{\text{зщ}} I_{\text{у(п)}}, \quad (9)$$

где  $I_{\text{доп}}$  – допустимый ток проводника, А;

$I_{\text{у(п)}} = 1,25 I_{\text{н.р}}$  – ток срабатывания в зоне перегрузки, для всех выключателей, А;

$K_{\text{зщ}}$  – коэффициент защиты; принимают  $K_{\text{зщ}} = 1,25$  – для взрыво- и пожароопасных помещений;  $K_{\text{зщ}} = 1$  – для нормальных (неопасных) помещений;  $K_{\text{зщ}} = 0,33$  – для предохранителей без тепловых реле в линии; для нашего случая примем  $K_{\text{зщ}} = 1$ .

Выберем сечение кабеля, питающего РП-4с нагрузкой 130 А. Питание осуществлено кабелем АВВГ с поливинилхлоридной изоляцией жил. Общее количество рабочих кабелей в лотке составляет пять штук – проложены однослойно. Температура окружающей среды  $+40^\circ\text{C}$ .

По таблице 1.3.3 в ПУЭ [12] определим поправочный коэффициент на температуру окружающей среды – 0,79 ( для температуры жил  $+65^\circ\text{C}$ , окружающего воздуха  $+25^\circ\text{C}$ ). Тогда допустимый ток (8):

$$I_{\text{доп}} \geq \frac{I_p}{K_{\text{п}} \cdot k_2} = \frac{130}{0,79 \cdot 1} = 164,6 \text{ А.}$$

По таблице 1.3.7 в ПУЭ [12] ближайшее значение допустимого тока – 170 А (для трехжильного кабеля, проложенного в воздухе).

Согласуем допустимый ток проводника с автоматом защиты 1SF (9):

$$I_{\text{доп}} \geq k_2 \cdot K_{\text{зщ}} I_{\text{у(п)}} = 1 \cdot 1 \cdot 1,25 \cdot 160 = 200 \text{ А.}$$

По таблице 1.3.7 в ПУЭ ближайшее значение допустимого тока – 200 А (для трехжильного кабеля, проложенного в воздухе).

Для питания РП-4 выбираем кабель АВВГ 4х150 мм<sup>2</sup>.

Произведем расчет сечения кабеля для питания ЭД-1. Электропроводка от РП-4 к ЭД-1 выполнена кабелем ВВГнг с поливинилхлоридной изоляцией жил. Проводка выполнена в производственном помещении с температурой окружающей среды +30°C, проложена в лотке. Расчетный ток (4):

$$I_{\text{д}} = \frac{P_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{8}{1,73 \cdot 0,38 \cdot 0,93 \cdot 0,908} = 14,4 \text{ А}$$

По таблице 1.3.3 в ПУЭ [12] определим поправочный коэффициент на температуру окружающей среды – 0,94 (для температуры жил +65°C, окружающего воздуха +25°C).

$$I_{\text{доп}} \geq \frac{I_p}{K_{\text{п}}} = \frac{14,4}{0,94} = 15,3 \text{ А}$$

По таблице 1.3.6 в ПУЭ [12] ближайшее значение допустимого тока – 19 А (для трехжильного кабеля, проложенного в воздухе).

Согласуем допустимый ток проводника с автоматом защиты 1SF (9):

$$I_{\text{доп}} \geq K_{\text{зщ}} I_{\text{у(п)}} = 1 \cdot 1,25 \cdot 20 = 25 \text{ А}$$

Для питания ЭД-1 выбираем кабель ВВГнг 4х4 мм<sup>2</sup>.

Выбранные кабели по допустимому нагреву необходимо проверить по потере напряжения. Допустимым диапазоном потерь в сетях 0,38 кВ является 4...6%. Проведем проверку кабельных линий по формуле [2]:

$$\Delta U_{\text{Н}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{расч}} \cdot \frac{l}{1000} \cdot (r_{\text{уд}} \cdot \cos \varphi + x_{\text{уд}} \cdot \sin \varphi), \quad (10)$$

где  $I_{\text{расч}}$  – расчетный ток линии, А;

$l$  – длина линии, км;

$r_{\text{уд}}, x_{\text{уд}}$  – активное и реактивное сопротивления 1 км проводника линии, Ом/км, представлены в таблице 3;

$\cos \varphi = 0,85$  - коэффициент мощности для промышленных зданий и сооружений.

Таблица 3 – Значения удельных сопротивлений кабелей, проводов

Площадь сечения жилы, мм <sup>2</sup>	Активное сопротивление при 20 °С, Ом/км, жилы		Реактивное сопротивление, Ом/км, кабеля напряжением, кВ		
	алюминиевой	медной	до 1	6	10
1	–	18,5	–	–	–
1,5	–	12,5	–	–	–
2,5	12,5	7,4	0,104	–	–
4	7,81	4,63	0,095	–	–
6	5,21	3,09	0,09	–	–
10	3,12	1,84	0,073	0,11	0,122
16	1,95	1,16	0,068	0,102	0,113
25	1,25	0,74	0,066	0,091	0,099
35	0,894	0,53	0,064	0,087	0,095
50	0,625	0,37	0,063	0,083	0,09
70	0,447	0,265	0,061	0,08	0,086
95	0,329	0,195	0,06	0,078	0,083
120	0,261	0,154	0,06	0,076	0,081
150	0,208	0,124	0,059	0,074	0,079

Продолжение таблицы 3

Площадь сечения жилы, мм <sup>2</sup>	Активное сопротивление при 20 °С, Ом/км, жилы		Реактивное сопротивление, Ом/км, кабеля напряжением, кВ		
	алюминиевой	медной	до 1	6	10
185	0,169	0,1	0,059	0,073	0,077
240	0,130	0,077	0,058	0,071	0,075

Проведем проверку кабеля АВВГ 4x150 мм<sup>2</sup> (длина линии 70 м) по потере напряжения для участка ШНН – РП-4(10):

$$\Delta U_H = \sqrt{3} \cdot 130 \cdot \frac{70}{1000} \cdot (0,208 \cdot 0,85 + 0,059 \cdot 0,53) = 3,28 \text{ В,}$$

$$\Delta U_H \% = \frac{\Delta U_H}{U_\phi} \cdot 100 = \frac{3,28}{380} \cdot 100 = 0,9 \%,$$

$$\Delta U_H = 0,9\% < \Delta U_{\text{доп}} = 4\%.$$

Проведем проверку кабеля ВВГнг 4x4 мм<sup>2</sup> (длина линии 35 м) по потере напряжения для участка РП-7 – ЭД-1 (10):

$$\Delta U_H = \sqrt{3} \cdot 14,4 \cdot \frac{35}{1000} \cdot (4,63 \cdot 0,93 + 0,095 \cdot 0,37) = 3,8 \text{ В,}$$

$$\Delta U_H \% = \frac{\Delta U_H}{U_\phi} \cdot 100 = \frac{3,8}{380} \cdot 100 = 1\%,$$

$$\Delta U_H = 1\% < \Delta U_{\text{доп}} = 4\%.$$

По результатам расчетов определено допустимое сечение жил и проведена проверка по потере напряжения, составляющая  $\Delta U_H = 0,9 - 1,0 \%$ , что полностью удовлетворяет условие  $\Delta U_H \% < \Delta U_{\text{доп}} = 4\%$ . В качестве кабельной линии ШНН – РП-4 применим АВВГ 4x150 мм<sup>2</sup>, для подключения ЭД-1 - ВВГнг 4x4 мм<sup>2</sup>.

## 2.5 Расчет токов короткого замыкания

Для расчета токов короткого замыкания [17] составим расчетную схему электроснабжения, представленную на рисунке 3, с указанием точек КЗ и элементов системы.

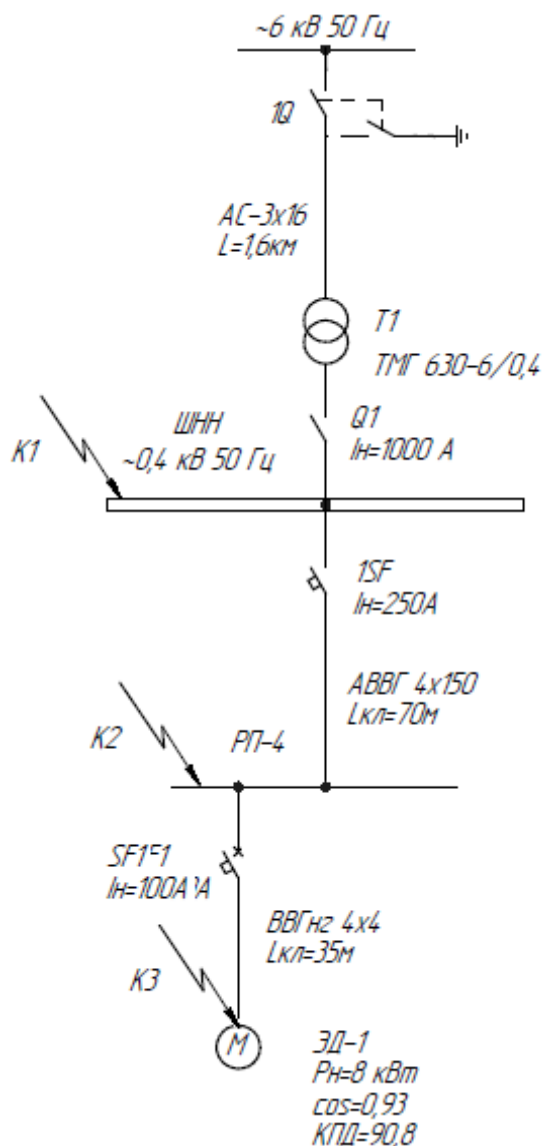


Рисунок 3 - Расчетная схема ЭСН

Рассчитаем сопротивление всех элементов системы ЭСН. Определим ток системы:

$$I_c = \frac{S_T}{\sqrt{3}U_c}, \quad (11)$$

где  $S_T$  – мощность трансформатора, кВА;

$U_c$  – напряжение системы, кВ.

$$I_c = \frac{S_T}{\sqrt{3}U_c} = \frac{630}{\sqrt{3} \cdot 6} = 61 \text{ А.}$$

Для воздушной линии  $L_{ВН}$  – 1,2 км по таблице 1.3.29 ПУЭ находим подходящий провод АС – 3\*10/1,8 с допустимым длительным током  $I_{доп} = 84$  А. Проверка по условиям короны не проводится, напряжение менее 35 кВ.

Найдем индуктивное сопротивление ВЛ:

$$X'_c = x_0 L_c, \quad (12)$$

где  $x_0 = 0,4$  – индуктивное сопротивление для ВЛ, Ом/км;

$L_c$  – протяженность линии, км.

$$X'_c = x_0 L_c = 0,4 \cdot 1,6 = 0,64 \text{ Ом.}$$

Найдем активное сопротивление для воздушной линии:

$$R'_c = r_0 L_c, \quad (13)$$

где  $r_0 = \frac{10^3}{\gamma S}$  – активное сопротивление для ВЛ, Ом/км;

$\gamma = 30$  – удельная проводимость для алюминия м/(Ом·мм<sup>2</sup>);

$S = 10$  – сечение проводника, мм<sup>2</sup>;  $L_c$  – протяженность линии, км.

$$R'_c = r_0 L_c = \frac{10^3}{30 \cdot 10} \cdot 1,6 = 5,3 \text{ Ом/км.}$$

Приведем полученные сопротивления к НН:

$$R_{\text{НН}} = R'_c \left( \frac{U_{\text{НН}}}{U_{\text{ВН}}} \right)^2, \quad (14)$$

где  $U_{\text{ВН}} = 6$  – напряжение по высокой стороне, кВ;

$U_{\text{НН}} = 0,4$  - напряжение по низкой стороне, кВ.

$$R_{\text{НН}} = R'_c \left( \frac{U_{\text{НН}}}{U_{\text{ВН}}} \right)^2 = 5,3 \cdot \left( \frac{0,4}{6} \right)^2 \cdot 10^3 = 23,6 \text{ мОм},$$

$$X_{\text{НН}} = X'_c \left( \frac{U_{\text{НН}}}{U_{\text{ВН}}} \right)^2, \quad (15)$$

$$X_{\text{НН}} = X'_c \left( \frac{U_{\text{НН}}}{U_{\text{ВН}}} \right)^2 = 0,64 \cdot \left( \frac{0,4}{6} \right)^2 \cdot 10^3 = 2,84 \text{ мОм}.$$

По таблице 4 определим сопротивления для трансформатора ТМГ 630 - 6/0,4.

Таблица 4 – Сопротивление трансформаторов 6 (10)/0,4 кВ

Мощность, кВ·А	$R_T$ , мОм	$X_T$ , мОм	$Z_T$ , мОм	$Z_T^{(1)}$ , мОм
25	153,9	243,6	287	3110
40	88	157	180	1949
63	52	102	114	1237
100	31,5	64,7	72	779
160	16,6	41,7	45	487
250	9,4	27,2	28,7	312
400	5,5	17,1	18	195
630	3,1	13,6	14	129
1000	2	8,5	8,8	81
1600	1	5,4	5,4	54

Для ТМГ 630 – 6/0,4:  $R_T = 3,1$  мОм;  $X_T = 13,6$  мОм;  $Z_T = 14$  мОм;  $Z_T^{(1)} = 129$  мОм.

По таблице 5 определим сопротивления для автоматических выключателей 1SF, SF1и разъединителя Q1.



Таблица 5 – Значение сопротивлений автоматических выключателей, рубильников, разъединителей до 1 кВ

$I_{н.а}$ , А	Автомат			Рубильник	Разъединитель
	$R_a$ , мОм	$X_a$ , мОм	$R_{п}$ , мОм	$R$ , мОм	$R$ , мОм
50	5,5	4,5	1,3	–	–
70	2,4	2	1	–	–
100	1,3	1,2	0,75	0,5	–
150	0,7	0,7	0,7	0,45	–
200	0,4	0,5	0,6	0,4	–
400	0,15	0,17	0,4	0,2	0,2
600	11,12	0,13	0,25	0,15	0,15
1000	0,1	0,1	0,15	0,08	0,08
1600	0,08	0,08	0,1	–	0,06
2000	11,07	0,08	0,08	–	0,03
2500	0,06	0,07	0,07	–	0,03
3000	0,05	0,07	0,06	–	0,02
4000	0,04	0,05	0,05	–	–

Для разъединителя Q1:  $I_{н.а} = 1000$  А;  $R = 0,08$  мОм.

Для автоматических выключателей:

1SF -  $I_{н.а} = 250$  А;  $R_a = 0,34$  мОм;  $X_a = 0,42$  мОм;  $R_{п} = 0,55$  мОм

(значения сопротивлений рассчитаны путем интерполяции).

SF1 -  $I_{н.а} = 100$  А;  $R_a = 1,3$  мОм;  $X_a = 1,2$  мОм;  $R_{п} = 0,75$  мОм.

По таблице 6 найдем удельные сопротивления для кабельных линий и рассчитаем их сопротивления.

Для кабельной линии АВВГ 4х150:

$$R_{кл1} = r_0 \cdot L_{кл1} = 0,208 \cdot 70 = 14,56 \text{ мОм,}$$

$$X_{кл1} = x_0 \cdot L_{кл1} = 0,079 \cdot 70 = 5,53 \text{ мОм.}$$

Для кабельной линии ВВГнг 4х4:

$$R_{\text{кл}2} = r_0 \cdot L_{\text{кл}1} = 4,63 \cdot 35 = 162 \text{ мОм},$$

$$X_{\text{кл}2} = x_0 \cdot L_{\text{кл}1} = 0,107 \cdot 35 = 3,7 \text{ мОм}.$$

Таблица 6 – Значения удельных сопротивлений кабелей, проводов

S жилы, мм <sup>2</sup>	r <sub>0</sub> , мОм/м при 20 °С жилы		x <sub>0</sub> , мОм/м	
	Al	Cu	Кабель с бумажной поясной изоляцией	Три провода в трубе или кабель с любой изоляцией (кроме бумажной)
	2	3	4	5
1	–	18,5	–	0,133
1,5	–	12,3	–	0,126
2,5	12,5	7,4	0,104	0,116
4	7,81	4,63	0,095	0,107
6	5,21	3,09	0,09	0,1
10	3,12	1,84	0,073	0,099
16	1,95	1,16	0,0675	0,095
25	1,25	0,74	0,0662	0,091
35	0,894	0,53	0,0637	0,088
50	0,625	0,37	0,0625	0,085
70	0,447	0,265	0,0612	0,082
95	0,329	0,195	0,0602	0,081
120	0,261	0,154	0,0602	0,08
150	0,208	0,124	0,0596	0,079
185	0,169	0,1	0,0596	0,78
240	0,13	0,077	0,0587	0,077

Значения переходных сопротивлений на ступенях распределения примем  $R_{c1} = 15$  мОм - распределительные устройства подстанции;  $R_{c2} = 20$  мОм - первичные распределительные цеховые пункты.

На рисунке 4 представлена схема замещения с указанием активных и реактивных сопротивлений.

Упрощенная схема замещения, с эквивалентными сопротивлениями ( $R_3$  и  $X_3$ ) между точками КЗ, представлена на рисунке 5.

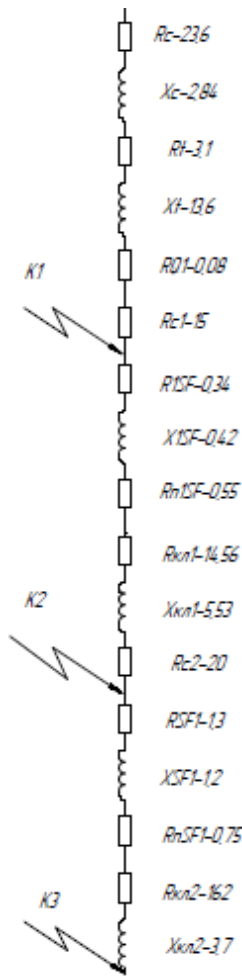


Рисунок 4 - Схема замещения

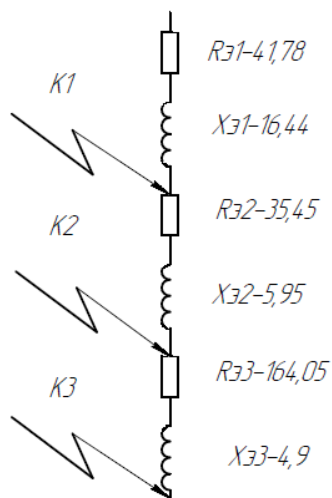


Рисунок 5 – Эквивалентная схема замещения

Эквивалентные сопротивления рассчитываются путем математического сложения.

$$R_{\text{э1}} = R_c + R_T + R_{Q1} + R_{c1} = 23,6 + 3,1 + 0,08 + 15 = 41,78 \text{ мОм},$$

$$X_{\text{э1}} = X_c + X_T = 2,84 + 13,6 = 16,44 \text{ мОм},$$

$$R_{\text{э2}} = R_{1SF} + R_{n1SF} + R_{кЛ1} + R_{c2} = 0,34 + 0,55 + 14,56 + 20 = 35,45 \text{ мОм},$$

$$X_{\text{э2}} = X_{1SF} + X_{кЛ1} = 0,13 + 31,2 + 0,325 = 0,42 + 5,53 = 5,95 \text{ мОм},$$

$$R_{\text{э3}} = R_{SF1} + R_{nSF1} + R_{кЛ2} = 1,3 + 0,75 + 162 = 164,05 \text{ мОм},$$

$$X_{\text{э3}} = X_{SF1} + X_{кЛ2} = 1,2 + 3,7 = 4,9 \text{ мОм}.$$

Рассчитаем полное сопротивление для каждой точки КЗ:

$$R_{к1} = R_{\text{э1}} = 41,78 \text{ мОм}; X_{к1} = X_{\text{э1}} = 16,44 \text{ мОм},$$

$$Z_{к1} = \sqrt{R_{к1}^2 + X_{к1}^2} = \sqrt{41,78^2 + 16,44^2} = 44,9 \text{ мОм},$$

$$R_{к2} = R_{\text{э1}} + R_{\text{э2}} = 41,78 + 35,45 = 77,23 \text{ мОм},$$

$$X_{к2} = X_{\text{э1}} + X_{\text{э2}} = 16,44 + 5,95 = 22,39 \text{ мОм},$$

$$Z_{к2} = \sqrt{R_{к2}^2 + X_{к2}^2} = \sqrt{77,23^2 + 22,39^2} = 80,4 \text{ мОм},$$

$$R_{к3} = R_{к2} + R_{\text{э3}} = 77,23 + 164,05 = 241,28 \text{ мОм},$$

$$X_{к3} = X_{к2} + X_{\text{э3}} = 22,39 + 4,9 = 27,29 \text{ мОм},$$

$$Z_{к3} = \sqrt{R_{к3}^2 + X_{к3}^2} = \sqrt{241,28^2 + 27,29^2} = 241,3 \text{ мОм}.$$

Произведем расчет трех- и двухфазных токов короткого замыкания. В соответствии с рисунком 6, определим значение ударного коэффициента  $K_y$ .

Ударный коэффициент  $K_y$  в точке К1:

$$K_{y1} = F \left( \frac{R_{к1}}{X_{к1}} \right) = F \left( \frac{41,78}{16,44} \right) = F(2,54) = 1,0, \quad (16)$$

где  $R_{к1}$  и  $X_{к1}$  – активное и индуктивное сопротивление в точке К1.

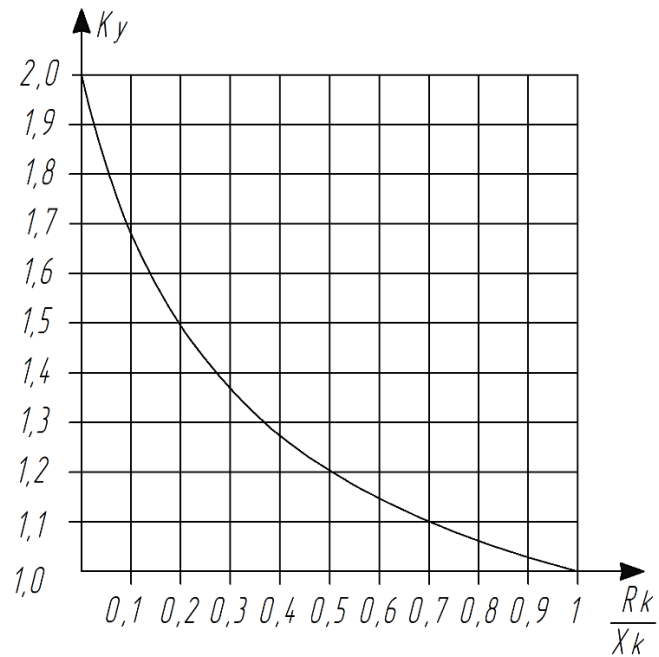


Рисунок 6 - Зависимость  $K_y = F\left(\frac{R_k}{X_k}\right)$

Ударный коэффициент  $K_y$ . в точке К2 (15):

$$K_{y2} = F\left(\frac{R_{K2}}{X_{K2}}\right) = F\left(\frac{77,23}{22,39}\right) = F(3,45) = 1,0.$$

Ударный коэффициент  $K_y$ . в точке К3 (15):

$$K_{y3} = F\left(\frac{R_{K3}}{X_{K3}}\right) = F\left(\frac{241,28}{27,29}\right) = F(8,84) = 1,0.$$

Тогда действующего значения ударного тока  $q$  равно:

$$q_1 = \sqrt{1 + 2(K_{y1} - 1)^2} = \sqrt{1 + 2(1,0 - 1)^2} = 1, \quad (17)$$

$$q_1 = q_2 = q_3 = 1.$$

Рассчитаем значения 3-фазного тока КЗ  $I_K^{(3)}$ :

$$I_{к1}^{(3)} = \frac{U_{к}}{\sqrt{3} \cdot Z_{к}}, \quad (18)$$

где  $U_{к}$  – линейное напряжение в точке КЗ, кВ;

$Z_{к}$  – полное сопротивление до точки КЗ, Ом.

$$I_{к1}^{(3)} = \frac{V_{к1}}{\sqrt{3} \cdot Z_{к1}} = \frac{0,4 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 44,9} = 5,14 \text{ кА},$$

$$I_{к2}^{(3)} = \frac{V_{к2}}{\sqrt{3} \cdot Z_{к2}} = \frac{0,38 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 80,4} = 2,73 \text{ кА},$$

$$I_{к3}^{(3)} = \frac{V_{к3}}{\sqrt{3} \cdot Z_{к3}} = \frac{0,38 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 241,3} = 0,9 \text{ кА}.$$

Рассчитаем значения 3-фазного ударного тока  $I_{у\kappa}$ :

$$I_{у\kappa 1} = q_1 I_{к1}^{(3)}, \quad (19)$$

где  $I_{к}^{(3)}$  – ток трехфазного КЗ, кА;

$q_1$  - коэффициент действующего значения ударного тока.

$$I_{у\kappa 1} = q_1 I_{к1}^{(3)} = 5,14 \text{ кА},$$

$$I_{у\kappa 2} = q_2 I_{к2}^{(3)} = 2,73 \text{ кА},$$

$$I_{у\kappa 3} = q_3 I_{к3}^{(3)} = 0,9 \text{ кА}.$$

Рассчитаем действующее значение ударного тока  $i_{у\kappa}$  [7]:

$$i_{у\kappa} = \sqrt{2} K_y I_{к}^{(3)}, \quad (20)$$

где  $K_y$  - ударный коэффициент в точке КЗ;

$I_{к}^{(3)}$  - ток трехфазного КЗ, кА.

$$i_{yк1} = \sqrt{2}K_{y1}I_{к1}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,0 \cdot 5,14 = 7,3 \text{ кА},$$

$$i_{yк2} = \sqrt{2}K_{y2}I_{к2}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,0 \cdot 2,73 = 3,9 \text{ кА},$$

$$i_{yк3} = \sqrt{2}K_{y3}I_{к3}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,0 \cdot 0,9 = 1,3 \text{ кА}.$$

Рассчитаем токи 2-фазного КЗ:

$$I_{к}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2}I_{к}^{(3)}, \quad (21)$$

где  $I_{к}^{(3)}$  - ток трехфазного КЗ, кА.

$$I_{к1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2}I_{к1}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 5,14 = 4,45 \text{ кА},$$

$$I_{к2}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2}I_{к2}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 2,73 = 2,36 \text{ кА},$$

$$I_{к3}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2}I_{к3}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 0,9 = 0,78 \text{ кА}.$$

Расчет однофазных токов короткого замыкания начнем с составления схемы замещения, представленной на рисунке 7, и нахождения сопротивления:

$$R_{пкЛ1} = 2r_0L_{кЛ}, \quad (21)$$

где  $r_0$  – активное сопротивление КЛ, мОм/м;

$L_{кЛ}$  – протяженность КЛ, м.

$$R_{пкЛ1} = 2 \cdot 0,208 \cdot 70 = 29,12 \text{ мОм},$$

$$R_{пкЛ2} = 2r_0L_{кЛ2} = 2 \cdot 4,63 \cdot 35 = 648,2 \text{ мОм}.$$

$$X_{пкЛ1} = X_{0п}L_{кЛ1}, \quad (22)$$

где  $X_{0п} = 0,15$  – индуктивное сопротивление петли «фаза-нуль» КЛ до 1 кВ при расчете однофазных КЗ, мОм/м.

$$X_{пкЛ1} = X_{0п} L_{кЛ1} = 0,15 \cdot 70 = 10,5 \text{ мОм},$$

$$X_{пкЛ2} = x_{0п} L_{кЛ2} = 0,15 \cdot 35 = 5,25 \text{ мОм}.$$

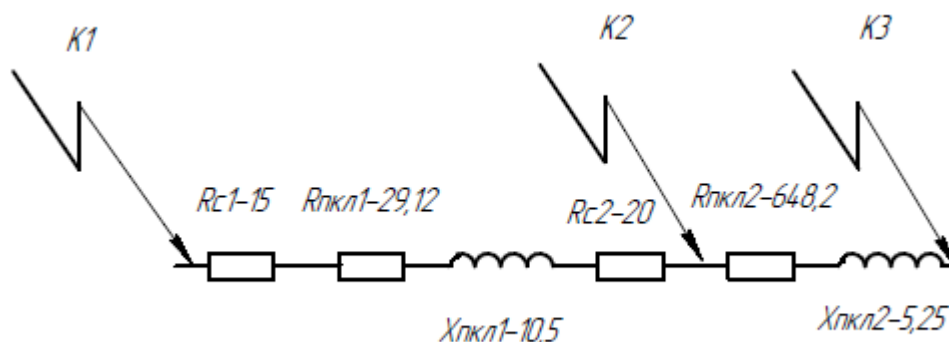


Рисунок 7 – Схема замещения для расчета 1-фазных токов КЗ

Рассчитаем полное сопротивление между точками КЗ:

$$Z_{п1} = 15 \text{ мОм},$$

$$R_{п2} = R_{с1} + R_{пкЛ1} + R_{с2} = 15 + 29,12 + 20 = 64,12 \text{ мОм},$$

$$X_{п2} = X_{пкЛ1} = 10,5 \text{ мОм},$$

$$Z_{п2} = \sqrt{R_{п2}^2 + X_{п2}^2} = \sqrt{64,12^2 + 10,5^2} = 65 \text{ мОм},$$

$$R_{п3} = R_{п2} + R_{пкЛ2} = 64,12 + 648,2 = 712,32 \text{ мОм},$$

$$X_{п3} = X_{п2} + X_{пкЛ2} = 10,5 + 5,25 = 15,75 \text{ мОм},$$

$$Z_{п3} = \sqrt{R_{п3}^2 + X_{п3}^2} = \sqrt{712,32^2 + 15,75^2} = 712,5 \text{ мОм}.$$

Найдем токи однофазных коротких замыканий:



$$I_k^{(1)} = \frac{U_{\text{кф}}}{Z_{\text{п}} + Z_{\text{Т}}^{(1)}/3}, \quad (22)$$

где  $U_{\text{кф}}$  - фазное напряжение в точке КЗ, кВ;

$Z_{\text{п}}$  - полное сопротивление петли «фаза-нуль» до точки КЗ, Ом;

$Z_{\text{Т}}^{(1)}/3$  - полное сопротивление трансформатора однофазному КЗ, Ом.

$$I_{\text{к1}}^{(1)} = \frac{V_{\text{кф}}}{Z_{\text{п1}} + Z_{\text{Т}}^{(1)}/3} = \frac{0,22 \cdot 10^3}{15 + 129/3} = 3,8 \text{ кА},$$

$$I_{\text{к2}}^{(1)} = \frac{V_{\text{кф}}}{Z_{\text{п2}} + Z_{\text{Т}}^{(1)}/3} = \frac{0,22 \cdot 10^3}{65 + 129/3} = 2,04 \text{ кА},$$

$$I_{\text{к3}}^{(1)} = \frac{V_{\text{кф}}}{Z_{\text{п3}} + Z_{\text{Т}}^{(1)}/3} = \frac{0,22 \cdot 10^3}{712,5 + 129/3} = 0,3 \text{ кА}.$$

Результаты расчетов токов короткого замыкания приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Составляющие токов короткого замыкания

Точка КЗ	$R_{\text{к}},$ мОм	$X_{\text{к}},$ мОм	$Z_{\text{к}},$ мОм	$\frac{R_{\text{к}}}{X_{\text{к}}}$	$K_{\text{у}}$	$\varphi$	$I_{\text{к}}^{(3)},$ кА	$i_{\text{у}},$ кА	$I_{\text{к}}^{(2)},$ кА	$Z_{\text{п}},$ мОм	$I_{\text{к}}^{(1)},$ кА
К1	41,78	16,44	44,9	2,54	1,0	1	5,14	7,3	4,45	15	3,8
К2	77,23	22,39	80,4	3,45	1,0	1	2,73	3,9	2,36	65	2,04
К3	241,28	27,29	241,3	8,84	1,0	1	0,9	1,3	0,78	712,5	0,3

Проверка выключателей 1SF и SF представлена в таблице 8.

Таблица 8 – Условия выбора автоматов защиты

1SF - EKF BA-99C/250		
Расчетные данные	Каталожные данные	Условия выбора
$U_{\text{ном}} = 0,4 \text{ кВ}$	$U_{\text{сет.ном}} = 0,69 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} \leq U_{\text{сет.ном}}$
$I_{\text{раб}} = 130 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 250 \text{ А}$	$I_{\text{раб}} \leq I_{\text{ном}}$

Продолжение таблицы 8

Расчетные данные	Каталожные данные	Условия выбора
$I_{max} = 162,5 \text{ A}$	$I_{ном} = 250 \text{ A}$	$I_{max} \leq I_{ном}$
$I_y = 7,3 \text{ кА}$	$I_{отк.ном} = 45 \text{ кА}$	$I_y \leq I_{отк.ном}$
$I_k^{(3)} = 5,14 \text{ кА}$	$I_{пик}^{(3)} = 90 \text{ кА}$	$I_k^{(3)} \leq I_{пик}^{(3)}$
SF1 - ЕКФ ВА-99С/100		
$U_{ном} = 0,4 \text{ кВ}$	$U_{сет.ном} = 0,69 \text{ кВ}$	$U_{ном} \leq U_{сет.ном}$
$I_{раб} = 14,4 \text{ A}$	$I_{ном} = 100 \text{ A}$	$I_{раб} \leq I_{ном}$
$I_{max} = 18 \text{ A}$	$I_{ном} = 100 \text{ A}$	$I_{max} \leq I_{ном}$
$I_y = 7,3 \text{ кА}$	$I_{отк.ном} = 25 \text{ кА}$	$I_y \leq I_{отк.ном}$
$I_k^{(3)} = 5,14 \text{ кА}$	$I_{пик}^{(3)} = 72 \text{ кА}$	$I_k^{(3)} \leq I_{пик}^{(3)}$

Выбранные автоматические выключатели серии ВА-99С/100 и ВА-99С/250 полностью соблюдают условия выбора аппаратов защиты.

## 2.6 Расчет защитного заземления

У электрического оборудования в аварийных режимах существует вероятность пробоя изоляции и замыкания на корпус фазных проводников, поэтому для снижения рисков поражения электрическим током обслуживающего персонала применяют защитное заземление [4].

Методика расчета приведена в [15] и [9]. Примем следующие исходные данные, где  $U_{эл} = 0,4 \text{ кВ}$  – напряжение электроустановок, кВ; грунт – суглинок; заземлитель – стальная труба  $\varnothing = 50 \text{ мм}$  и  $l = 3 \text{ м}$ ;  $H = 0,7$  – глубина заложения стержней в земле, м; соединение заземлителей – стальная полоса шириной  $b = 50 \text{ мм}$ .

Рассчитаем удельное сопротивление грунта для вертикальных стержней:

$$\rho_{о.с} = \psi_B \cdot \rho_0, \quad (23)$$

где  $\psi_B = 1,5$  - коэффициент сезонности, принят по [15, таблица 3 и 4];

$\rho_0 = 100$  - удельное сопротивление грунта, Ом · м.

$$\rho_{0.c} = \psi_B \cdot \rho_0 = 1,5 \cdot 100 = 150 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Найдем сопротивление растеканию тока для одиночного заземлителя:

$$R_c = \frac{\rho_{0.c}}{2\pi l_c} \cdot \left[ \left( \ln \frac{2l_c}{d} \right) + 0,5 \ln \left( \frac{4t + l_c}{4t - l_c} \right) \right], \quad (24)$$

где  $l_c = 3$  – длина трубы, м;

$t = H + 0,5l_c = 2,2$  – расстояние от поверхности земли до середины стержня, м.

$d = 0,05$  – диаметр трубы, м.

$$\begin{aligned} R_c &= \frac{\rho_{0.c}}{2\pi l_c} \cdot \left[ \left( \ln \frac{2l_c}{d} \right) + 0,5 \ln \left( \frac{4t + l_c}{4t - l_c} \right) \right] = \\ &= \frac{150}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \cdot \left[ \left( \ln \frac{2 \cdot 3}{0,05} \right) + 0,5 \ln \left( \frac{4 \cdot 2,2 + 2,2}{4 \cdot 2,2 - 2,2} \right) \right] = 40,2 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Предварительное число заземлителей равно:

$$n_{\text{пр}} \cdot \eta_c = \frac{R_c}{R_3}, \quad (25)$$

где  $R_3 = 4$  – сопротивление растеканию тока заземляющего устройства в соответствии с ПУЭ [12], Ом;

$\eta_c$  – коэффициент использования вертикальных стержней.

$$n_{\text{пр}} \cdot \eta_c = \frac{R_c}{R_3} = \frac{40,2}{4} = 10 \text{ шт.}$$

Длина соединительной полосы равна длине здания  $l_{\text{п}} = 50$  м, тогда

$$\alpha = \frac{l_{\text{п}}}{n_{\text{пр}}}, \quad (26)$$

где  $\alpha$  – расстояние между стержнями, м.

$$\alpha = \frac{l_{\text{п}}}{n_{\text{пр}}} = \frac{50}{10} = 5 \text{ м.}$$

Отношение расстояния между заземлителями к их длине:

$$\frac{\alpha}{l_c} = \frac{5}{3} = 1,7. \quad (27)$$

Рассчитаем удельное сопротивление грунта для соединительной полосы (23):

$$\rho_{\text{с.п}} = \psi_{\text{в}} \cdot \rho_0 = 3 \cdot 100 = 300 \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

где  $\psi_{\text{в}} = 3$  - коэффициент сезонности, принят по [15, таблица 3 и 4].

Найдем сопротивление растеканию тока соединительной полосы:

$$R_{\text{п}} = \frac{\rho_{\text{с.п}}}{2\pi l_{\text{п}}} \cdot \ln \left( \frac{2 \cdot l_{\text{п}}^2}{b \cdot H} \right), \quad (28)$$

где  $b = 0,05$  – ширина полосы, м.

$$R_{\text{п}} = \frac{\rho_{\text{с.п}}}{2\pi l_{\text{п}}} \cdot \ln \left( \frac{2 \cdot l_{\text{п}}^2}{b \cdot H} \right) = \frac{300}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} \cdot \ln \left( \frac{2 \cdot 50^2}{0,05 \cdot 0,7} \right) = 11,4 \text{ Ом.}$$

По таблице 9 примем коэффициент использования вертикальных стержней  $\eta_c = 0,74$ .

По таблице 10 примем коэффициент использования горизонтальных полосовых заземлителей  $\eta_{\text{п}} = 0,75$ .

Рассчитаем результирующее сопротивление заземляющего устройства:

$$R_{\text{зу}} = \frac{(R_c \cdot R_{\text{п}})}{(R_c \cdot \eta_{\text{п}}) + (R_{\text{п}} \cdot n_{\text{пр}} \cdot \eta_c)}, \quad (29)$$

$$R_{\text{зв}} = \frac{(R_c \cdot R_{\text{п}})}{(R_c \cdot \eta_{\text{п}}) + (R_{\text{п}} \cdot n_{\text{пр}} \cdot \eta_c)} = \frac{40,2 \cdot 11,4}{(40,2 \cdot 0,75) + (11,4 \cdot 10 \cdot 0,74)} = 4 \text{ Ом.}$$

Таблица 9 – Коэффициенты использования вертикальных стержней

Число стержней	Отношение расстояния между заземлителями к их длине ( $\frac{\alpha}{l_c}$ ) при размещении					
	1	2	3	1	2	3
	в ряд			по контуру		
2	0,85	0,91	0,94	-	-	-
4	0,73	0,83	0,89	0,69	0,78	0,85
6	0,65	0,77	0,85	0,61	0,73	0,8
10	0,59	0,74	0,81	0,55	0,68	0,76
20	0,48	0,67	0,76	0,47	0,63	0,71
40	-	-	-	0,41	0,58	0,66
60	-	-	-	0,39	0,55	0,64
100	-	-	-	0,36	0,52	0,62

Таблица 10 – Коэффициенты использования горизонтальных полосовых заземлителей

$\frac{\alpha}{l_c}$	Число стержневых заземлителей							
	2	4	6	10	20	40	60	100
Стержни размещены в ряд								
1	0,85	0,77	0,72	0,62	0,42	-	-	-
2	0,94	0,89	0,84	0,75	0,56	-	-	-
3	0,96	0,92	0,88	0,82	0,68	-	-	-
Стержни размещены по контуру								
1	-	0,45	0,4	0,34	0,27	0,22	0,2	0,19
2	-	0,55	0,48	0,4	0,32	0,29	0,26	0,23
3	-	0,7	0,64	0,56	0,45	0,39	0,36	0,33

Вывод по разделу 2.

По результатам расчетов определен минимальный ток расцепителя  $I_{\text{н.р.}}$  для 1SF и SF1. В качестве устройства защиты установим автоматические выключатели ЕКФ ВА-99С/250 с  $I_{\text{н.р.}} = 160 \text{ А}$  и ЕКФ ВА-99С/100 с  $I_{\text{н.р.}} = 20 \text{ А}$ . Для тепловой защиты ЭД-1 выбираем электромагнитный пускатель серии КМЭ – 1810 с РТЭ – 1321 [6],  $I_{\text{н.т.}} = 18 \text{ А}$ .

Произведен расчет и выбор сечения жил по допустимому нагреву с проверкой по потере напряжения, которая составила  $\Delta U_H = 0,9 - 1,0 \%$ , что полностью удовлетворяет условию  $\Delta U_H \% < \Delta U_{\text{доп}} = 4\%$ . Для подключения линии ШНН – РП-4 применим АВВГ 4x150 мм<sup>2</sup>, участок РП-4–ЭД-1 выполним кабелем ВВГнг 4x4 мм<sup>2</sup>.

Полученные значения низковольтных токов короткого замыкания показали, что самым опасным из НКЗ является трехфазное КЗ. Именно его ударный ток был использован для проверки выбранных автоматов защиты.

Была определена расчетная величина результирующего сопротивления заземляющего устройства. В качестве системы заземления примем горизонтальный заземлитель из стальной полосы шириной  $b = 50$  мм и длиной  $l = 50$  м, вертикальный заземлитель из стальной трубы диаметром  $\varnothing = 50$  мм и длиной  $l = 3$  м в количестве 10 шт. Значение результирующего сопротивления заземляющего устройства равно  $R_{\text{зу}} = 4$  Ом, что соответствует требованию [4, приложение В]  $R_{\text{зу}} \leq R_3 = 4$  Ом для сетей до 1 кВ.

### **3 Разработка АСУ для предприятия ООО «ВИП Универсал»**

Система электроснабжения предприятия осуществлена от собственной КТП с трансформатором ТМГ (2)-630/6-У1. Для обеспечения бесперебойной и непрерывной работы электроприемников, отвечающих за технологический процесс, предусмотрен ввод до шкафа автоматического ввода резерва (АВР) от независимого источника энергии.

Главное оборудование технологического процесса, выполненное на базе асинхронных электродвигателей, представлено моноблочными фланцевыми насосами, центробежными погружными насосами, диаметральными вентиляторами, а также приводом конвейерной линии.

#### **3.1 Неисправности и методы контроля состояния силового электрооборудования**

К основным видам неисправностей представленного оборудования можно отнести следующее: изменение температуры и уровня масла в силовом трансформаторе; отклонение напряжения от его номинального значения, обрыв фазных проводников; высокий нагрев обмоток ЭД, вследствие протекания повышенных токов в электрической цепи; «сухой ход» насосов; увеличение момента на валу по причине повышенного износа подшипников.

Все методы диагностирования оборудования делятся на две группы [16]: методы неразрушающего и разрушающего контроля. Метод неразрушающего контроля (МНК) – метод контроля, при котором обследуемое оборудование (изделие) не подвергается разрушению. Метод разрушающего контроля (МРК) – метод контроля, требующий разрушения оборудования (изделия). В рамках производства, предпочтительнее МНК, так как главной задачей системы контроля состояния силового электрооборудования является предупреждение аварийных режимов работы без отрыва от производства.

### 3.2 Технологическая защита трансформатора

Контроль температуры масла трансформатора осуществляет общепромышленный датчик ОВЕН ДТПК 135-0910.200 [11] – термоэлектрический преобразователь с чувствительным элементом КТМС (Кабель Термопарный с Минеральной изоляцией в Стальной оболочке) «хромель-алюмель», с изолированным исполнением рабочего спая, диаметр КТМС 4,5мм, с металлической коммутационной головкой, материал защитной арматуры – сталь 12Х18Н10Т, с длиной монтажной части 200 мм.

Для указания уровня масла и сигнализации при его минимальном и максимальном уровнях предусмотрен маслоуказатель стрелочный МС2 [14] – 190 – для расширителя без гибкой оболочки с условной длиной рычага 190 мм.

Средством измерения температуры выберем измеритель-регулятор микропроцессорный двухканальный ОВЕН 2ТРМ1 [11]. Монтаж температурного датчика и маслоуказателя выполнить кабелем МКЭШ 3x0,75 мм<sup>2</sup> с защитным экраном. Общая схема подключения представлена на рисунке 8.

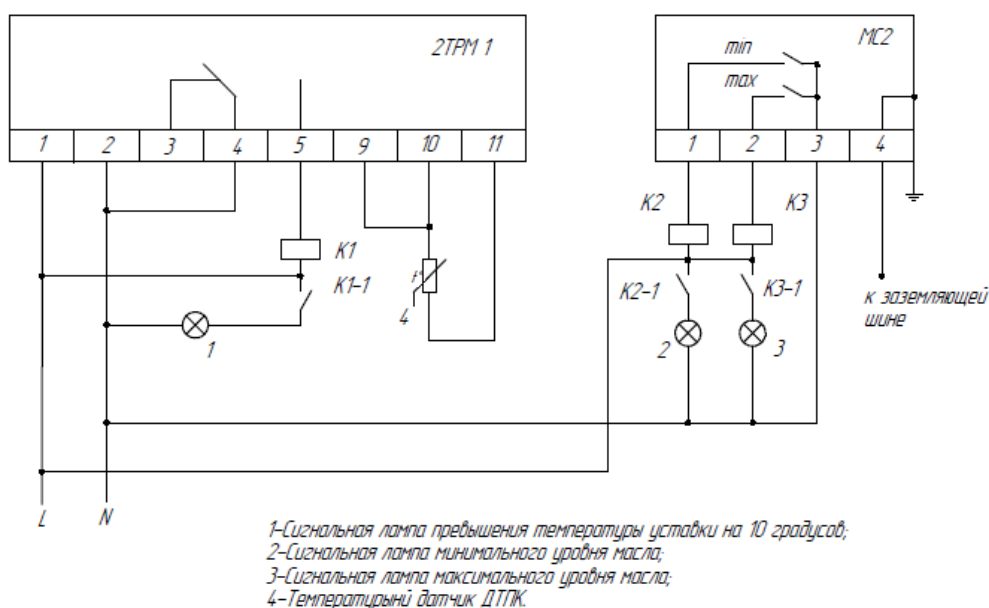


Рисунок 8 – Схема подключения 2ТРМ1 и МС2



В установившемся режиме работы трансформатора контакты 3-4 замкнуты, питание на выводах катушки *K1* отсутствует. При превышении порогового значения уставки на 10°C (программируется в 2ТРМ1) контакты 4-5 замыкаются, загорается сигнальная лампа 1, сигнализирующая о перегреве.

При достижении минимальной или максимальной отметки уровня масла, встроенный геркон маслоуказателя МС-2, изменяя положение контактов 1-3 или 2-3, подает управляющее напряжение на катушку *K2* или *K3*, которая, в свою очередь, коммутирует контакты сигнальной лампы минимального или максимального уровня масла.

### **3.3. Автоматический ввод резерва**

Шкаф автоматического ввода резерва (АВР) предусматривает два ввода – основной подключается от действующей понизительной подстанции предприятия, резервный – независимый источник энергии. Переход на резервную линию происходит автоматически не только при пропадании напряжения на основной линии, но и в случае перекоса и последовательности фаз.

Устройство АВР индивидуального исполнения на базе электромагнитных пускателей серии ПМ12-125100, реле контроля фаз РКФ-23 и промежуточных реле РП-22 [6]. Общий вид схемы АВР представлен на рисунке 9.

При работе от «Сети» питание на катушку *K1* подается с фазного проводника (коммутирующие контакты *КМ1* замкнуты) и нулевого, поданного через *K2 – 2* (коммутирующие контакты *КМ2* разомкнуты). Контакты 21-24 замкнуты, реле РКФ-24 включено. Работа катушки *K3*, контакт *K3 – 2* разомкнут.

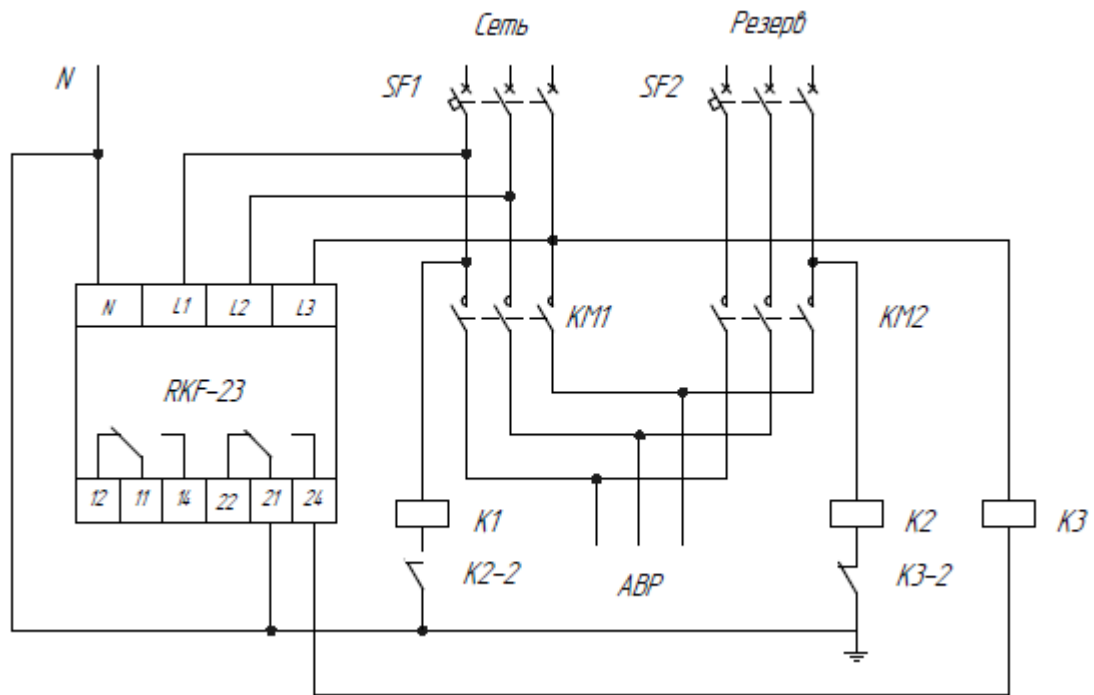


Рисунок 9 – Схема АВР

При отсутствии напряжения в «Сети» (коммутирующие контакты *KM1* разомкнуты), реле *RKF-24* выключено и переключает контакты в положение 21-22, питание катушки *K2* осуществляется с фазного проводника «Резерв» (коммутирующие контакты *KM2* замкнуты) и нулевого, поданного через *K3 – 2* (контакт замкнут, реле *K3* выключено).

### 3.4 Защита насосов от «сухого хода»

«Сухой ход» насоса – аварийный режим работы, когда перекачиваемая среда не поступает в насос, что приводит к необратимым процессам в гидроагрегате – ухудшение эффективности работы или полный выход из строя.

Для предотвращения «сухого хода» применим реле уровня *RL-SA* [6] в системе пуска-останова электродвигателя с датчиком уровня *ОВЕН ДУ1.19,5* [11] – датчик уровня кондуктометрический с длиной стержня 1,95 м.

Общий вид схемы подключения реле и датчика представлен на рисунке 10.

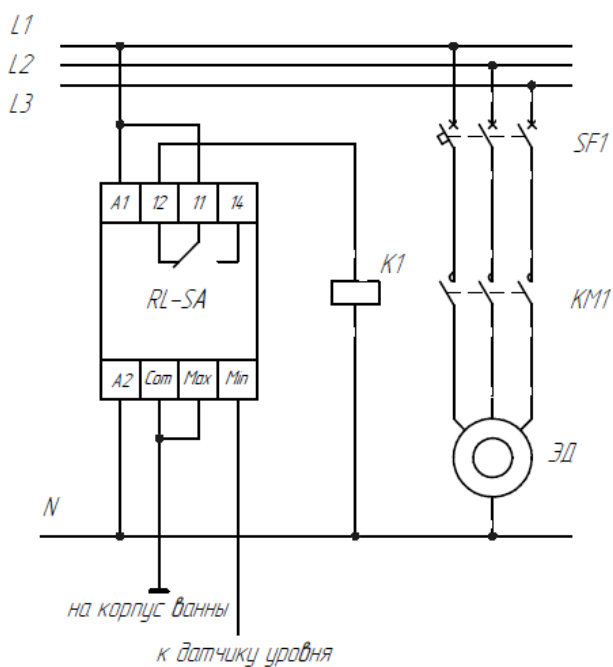


Рисунок 10 – Схема подключения реле уровня

Принцип работы: уровень жидкости в ванне выше уровня MIN – реле отключено, контакты 11-12 замкнуты, насос включен. При уменьшении уровня ниже MIN включается реле, контакты переключаются в положение 11-14, насос не работает.

### 3.5 Контроль параметров электродвигателей

Для оценки состояния электродвигателей применим такие виды технического диагностирования [20], как термометрия – контроль технического состояния технологического оборудования с помощью измерения температуры, и виброакустическая диагностика - контроль технического состояния технологического оборудования с помощью измерения параметров вибрации.

Для измерения температуры воспользуемся датчиком ДТС214 – 50М.В3.30 [11]- термопреобразователь сопротивления медный 50М, модель 214, класс допуска В, с трехпроводной схемой соединений, длиной монтажной части 30 мм, длиной кабельного вывода 0,2 м, диапазон измерения: -50...+150 °С. Место установки – статорная обмотка.

Для оценки вибрации установим у основания опоры подшипника датчик DVA 241.252 [10] – интегральный датчик ускорения в цилиндрическом малогабаритно корпусе, с двухпроводной схемой соединения, крепление на шпильку М6, тип выходного сигнала 4-20 мА.

Расположение точек измерения вибрации асинхронного двигателя с горизонтальным положением вала показано рисунке 11.

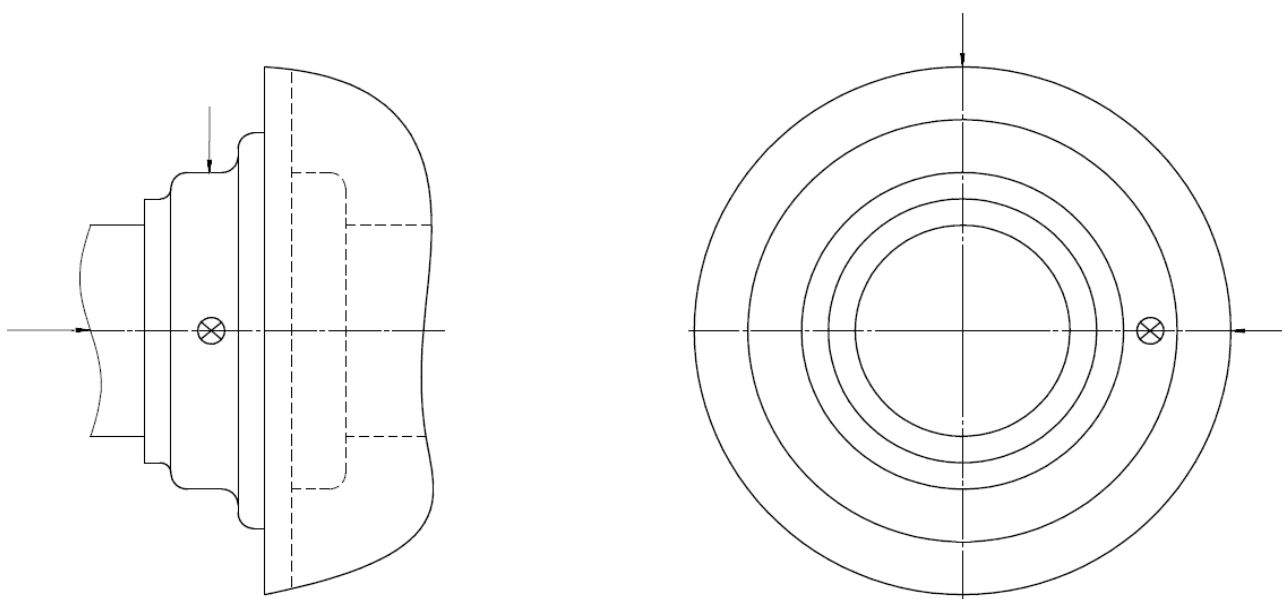


Рисунок 11 – Точки установки датчиков

Согласно ГОСТ Р ИЕС 60034-14 – 2014, уровни вибрации не должны превышать значений, указанных в таблице 11 [3].

Таблица 11 – Максимально допустимые значения вибросмещения, виброскорости и виброускорения для различных высот оси вращения вала

Категория машины	Крепление	Высота оси вращения, мм								
		$56 \leq H \leq 132$			$132 \leq H \leq 280$			$H > 280$		
		Вибросмещение, $\mu\text{м}$	Виброскорость, мм/с	Виброускорение, $\text{м/с}^2$	Вибросмещение, $\mu\text{м}$	Виброскорость, мм/с	Виброускорение, $\text{м/с}^2$	Вибросмещение, $\mu\text{м}$	Виброскорость, мм/с	Виброускорение, $\text{м/с}^2$
А	Упругое	25	1,6	2,5	35	2,2	3,5	45	2,8	4,4
	Жесткое	21	1,3	2,0	29	1,8	2,8	37	2,3	3,6
В	Упругое	11	0,7	1,1	18	1,1	1,7	29	1,8	2,8
	Жесткое	-	-	-	14	0,9	1,4	24	1,5	2,4

Устройство контроля токов асинхронного электродвигателя, представленную на рисунке 12, осуществим с помощью трансформатора тока ТТЕ-А и цифрового трехфазного амперметра АД-963s [6].

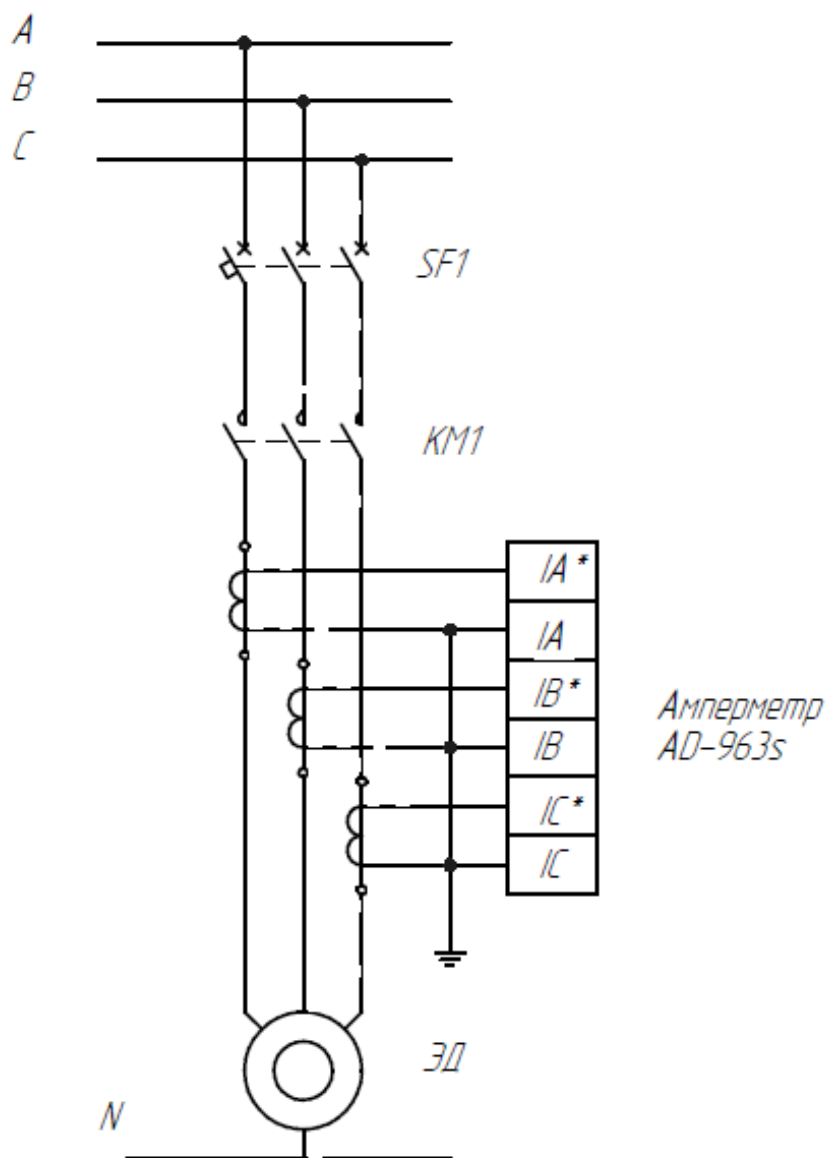


Рисунок 12 – Схема включения амперметра

Для подключения датчиков ко вторичным приборам выбираем кабель МКЭШ 3x0,75 мм<sup>2</sup>. В качестве системы мониторинга температуры и уровня вибрации применим восьмиканальный ПИД-регулятор ОВЕН ТРМ 148 [11].

Вывод по разделу 3.

Применение температурного датчика и маслоуказателя позволит контролировать работу силового трансформатора в режиме реального времени и оперативно реагировать на любые изменения.

Наличие реле контроля фаз избавляет технологическое оборудование от скачков напряжения и обрыва фазных проводников, что может являться аварийным режимом работы и причиной выхода его из строя.

Применив реле уровня, мы обезопасим не только электрическую, но и механическую часть насоса от нежелательного перегрева и преждевременного износа.

Контроль параметров электродвигателя с помощью датчиков температуры и виброскорости позволит на ранней стадии выявить дефект подшипниковой группы, а также отклонение температурного режима обмотки статора.

## Заключение

По итогам работы составлен перечень оборудования технологического процесса, выполненного на базе асинхронных электродвигателей, который представляют моноблочные фланцевые насосы, центробежные погружные насосы, диаметральные вентиляторы, а также привод конвейерной линии.

Произведен расчет и выбор автоматов защиты и тепловых реле магнитных пускателей на примере распределительного силового пункта (РП-7). Выбор кабельных линий по допустимому длительному току показал, что в нормальном режиме потери напряжения в сети 0,4 кВ не превышают 4 %, что соответствует ГОСТ 32144-2013.

Расчета токов КЗ в сети напряжением до 1 кВ показал, что самым опасным из НКЗ является трехфазное КЗ  $I_k^{(3)} = 5,14$  кА. Именно его ударный ток был использован для проверки выбранных автоматов защиты.

Применено защитное заземление с результирующим сопротивлением заземляющего устройства  $R_{\Sigma} = 4$  Ом, что соответствует ПУЭ для сетей 0,4 кВ.

Итогом выпускной квалификационной работы стало внедрение автоматизации системы контроля состояния силового электрооборудования, что позволило использовать метод неразрушающего контроля с применением таких средств измерения и мониторинга, как датчики температуры ОБЕН ДТПК и ДТС214, маслоуказатель МС-2, реле контроля фаз RKF-23 и реле уровня RL-SA, датчик уровня ОБЕН ДУ1, датчик вибрации DVA 241.252, а также амперметр AD-963s с трансформатором тока ТТЕ-А.

Применение системы автоматического контроля состояния облегчает работу обслуживающего персонала, снижает вероятность аварийных режимов работы технологического оборудования, уменьшая финансовую нагрузку предприятия в будущем.



## Список используемой литературы

1. Анчарова Т.В. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений: учебник. М.: ИНФРА-М, 2020. 154 с.
2. Вахнина В.В., Черненко А.Н. Системы электроснабжения: электронное учебно-методическое пособие. [Электронный ресурс]: URL: [https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/2943/1/Vahnina%20Chernenko\\_EUMI\\_Z.pdf](https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/2943/1/Vahnina%20Chernenko_EUMI_Z.pdf) (дата обращения: 19.11.2023).
3. ГОСТ Р ИЕС 60034-14 – 2014. Машины электрические вращающиеся. Часть 14. Механическая вибрация некоторых видов машин с высотой оси вращения 56 мм и более. Измерения, оценка и пределы вибраций. [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200120653?ysclid=lpk3ja87cq120043893> (дата обращения: 19.11.2023).
4. ГОСТ Р 58882-2020. Заземляющие устройства. Системы уравнивания потенциалов. Заземлители. Заземляющие проводники. Технические требования. [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200173634?section=text> (дата обращения: 19.11.2023).
5. Дудников Е.Г. Автоматическое управление в химической промышленности: учебник для вузов. М.: Химия, 1987. 368 с.
6. Импортер и представитель торговой марки EKF (ООО «Электрорешения»). [Электронный ресурс]: URL: <https://ekfgroup.com/ru/catalog> (дата обращения: 19.11.2023).
7. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: учебник для студентов высших учебных заведений. М.: Интермет Инжиниринг, 2005. 672 с.
8. Мельников М.А. Внутрицеховое электроснабжение: учебное пособие. Томск: Томский политехнический университет, 2007. 167 с.

9. Наумова Т.В. Безопасность жизнедеятельности: пособие по выполнению практической работы «расчет защитного заземления». М.: МГТУ ГА, 2010. 20 с.
10. Научно-производственное предприятие ООО «ТИК». [Электронный ресурс]: URL: [https://www.tik.perm.ru/o\\_predpriyatii/](https://www.tik.perm.ru/o_predpriyatii/) (дата обращения: 19.11.2023).
11. Оборудование для автоматизации ООО «Производственное Объединение ОВЕН». [Электронный ресурс]: URL: <https://owen.ru/> (дата обращения: 19.11.2023).
12. Правила устройства электроустановок: действующие разделы 6-го и 7-го изданий. М.: ИНФРА-М, 2023. 832 с.
13. Предместьин В.Р. Автоматизированные системы управления химико-технологическими процессами и производствами: учебное пособие. Новомосковск: ФГБОУ ВО Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Новомосковский институт (филиал), 2021. 110 с.
14. Производитель электротехнического оборудования ООО «Тольяттинский Трансформатор». [Электронный ресурс]: URL: <https://www.transformator.com.ru/ttabout/> (дата обращения: 19.11.2023).
15. Тихонова О.В., Кондрашова О.В. Расчет защитного заземления и зануления: методические указания к практическим занятиям. Новосибирск: НТИ МГУДТ, 2012. 22 с.
16. Хальясмаа А.И. Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций: учебное пособие. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2015. 64 с.
17. Шеховцов В.П. Расчет и проектирование схем электроснабжения: методическое пособие для курсового проектирования. М.: ИНФРА-М, 2019. 214 с.
18. Шеховцов В.П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению: учебное пособие. М.: ИНФРА-М, 2019. 136 с.

19. Электротехническое оборудование ООО «Звездаэлектроника».  
[Электронный ресурс]: URL: <https://zvezda-el.ru/> (дата обращения: 19.11.2023).

20. Яцура А.И. Система технического обслуживания и ремонта  
общепромышленного оборудования: справочник. М.: НЦ ЭНАС, 2006. 360 с.