

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 Реконструкция системы электроснабжения производства сульфат-нитрат аммония

Обучающийся

И.В. Ожигин

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н. О.В. Самолина

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

Тольятти 2022

## Аннотация

В данной бакалаврской работе спроектирована обновленная система электроснабжения производства сульфат-нитрат аммония. Определены ожидаемые нагрузки системы электроснабжения.

Произведен подбор типа и числа трансформаторов. Тип подбирался исходя из экономического сравнения.

Выбрано защитное оборудование и проводники системы электроснабжения по ожидаемым нагрузкам. Произведена проверка выбранного электрооборудования и проводников. Составлена актуализированная схема электроснабжения производства.

Для проведения проверки составлена схемы: однолинейная и замещения. По ним проведён расчёт токов короткого замыкания.

Рассмотрены и рассчитаны параметры заземления и молниезащиты производства.

Бакалаврская работа состоит из пояснительной записки объемом 57 страниц, дополняемой 10 таблицами, 4 рисунками и 6 чертежами А1. Работа выполнена согласно требованиям [11].

## Содержание

|   |    |
|---|----|
| Введение.....   | 4  |
| 1 Описание объекта проектирования .....                             | 5  |
| 2 Определение ожидаемых электрических нагрузок .....                | 8  |
| 2.1 Значение нагрузок от электрооборудования.....                   | 8  |
| 2.2 Определение общих электрических нагрузок по производству .....  | 11 |
| 3 Расчёт и выбор трансформаторов.....                               | 16 |
| 3.1 Вариант 1 .....   | 16 |
| 3.2 Вариант 2 .....   | 21 |
| 4 Выбор и обоснование схемы производственного электроснабжения..... | 26 |
| 5 Выбор оборудования внутрицеховой сети .....                       | 27 |
| 5.1 Выбор кабельных линий .....                                     | 27 |
| 5.2 Выбор автоматических выключателей .....                         | 28 |
| 5.3 Выбор измерительного трансформатора тока .....                  | 28 |
| 6 Выбор комплектной трансформаторной подстанции .....               | 30 |
| 7 Значение токов коротких замыканий на различных участках .....     | 31 |
| 7.1 Данные из расчётной схемы .....                                 | 32 |
| 7.2 Расчёт токов коротких замыканий .....                           | 34 |
| 7.2.1 Трёхфазное КЗ.....  | 34 |
| 7.2.2 Двухфазное КЗ .....   | 37 |
| 7.2.3 Однофазное КЗ.....  | 40 |
| 8 Определение параметров молниезащиты производства.....             | 44 |
| 9 Расчёт параметров заземления производства.....                    | 46 |
| 10 Проверочный расчёт выбранного электрооборудования.....           | 49 |
| 10.1 Проверка автоматических выключателей .....                     | 49 |
| 10.2 Проверка кабельных линий на потерю напряжения .....            | 50 |
| Заключение .....  | 53 |
| Список используемых источников.....                                 | 54 |

## Введение

Химическая отрасль в мире является важной частью экономики каждой страны. В качестве продуктов данного направления выступают синтетические смолы, пластмассы, каучук, волокна и прочее. В городе Тольятти имеется ряд заводов, производящих химическую продукцию различного типа. К передовым заводам относятся «КуйбышевАзот» и «Тольяттиазот».

Одной из выпускаемой продукции «КуйбышевАзота» является сульфат-нитрат аммония. Продукт представляет собой минеральное удобрение эффективное в растениеводстве. Это удобрение способствует плодородию, позитивно воздействует на урожай. Сам завод «КуйбышевАзот» имеет давнюю историю, которая началась ещё в 1961 году. За период работы, к 2022 году система электроснабжения несколько раз подвергалась модернизации и реконструкции в виду введения новых мощностей, постройке новых цехов, изменению технического процесса производства. Сегодня компания планомерно расширяется и улучшается по заложенному в её стратегии плану.

В связи с этим тема реконструкции химического предприятия по производству сульфат-нитрат аммония, является актуальной ввиду потребности в продукте и изменениях, внедряемых в технологические процессы. Целью выпускной квалификационной работы является повышение качества электроэнергии и надежности работы электросистемы, находящийся на производстве.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- осуществить расчёт ожидаемых нагрузок производства;
- произвести выбор типа, числа и мощности КТП;
- выбрать электрооборудование для защиты системы и проводники;
- определить значения токов короткого замыкания в системе;
- произвести проверку выбранного электрооборудования.

## 1 Описание объекта проектирования

Назначение проектируемого производства: изготовление сульфат-нитрат аммония в виде гранулированного удобрения.

Основные виды используемого оборудования в технологии изготовления:

- реактор;
- резервуар перемешивания;
- насос.

Остальное оборудование является вспомогательным. Управление производством производится телемеханическим способом через шкафы управления.

Параметры оборудования взяты из опросных листов на оборудование, поэтому обозначение марки оборудования отсутствует.

Напряжение на ГПП – 6 кВ.

Двухсменный график работы производства. Первая категория надежности оборудования участвующего в технологическом процессе. Вспомогательное оборудование имеет вторую категорию.

Размеры производства: А х В х Н = 50х40х8 м.

Расположение оборудования указано на рисунке 1. Перечень оборудования на производстве и паспортные данные указаны в таблице 1.

Таблица 1 - Исходные данные оборудования на объекте

| Номер на плане | Наименование            | Количество, шт. | Р <sub>пасп.</sub> , кВт | Примечание |
|----------------|-------------------------|-----------------|--------------------------|------------|
| 1              | Резервуар перемешивания | 2               | 18,5                     | -          |
| 2              | Конвейер ленточный      | 2               | 15                       | -          |

Продолжение таблицы 1

| Номер на плане | Наименование   | Количество,<br>шт. | Р <sub>пасп.</sub> , кВт | Примечание                 |
|----------------|--|--------------------|--------------------------|----------------------------|
| 3              | Дозатор<br>наполнителя                                 | 2                  | 4                        | -                          |
| 4              | Кран мостовой  | 2                  | 4                        | ПВ=60%                     |
| 5              | Шкаф управления  | 8                  | 1*                       | *- Усредненное<br>значение |
| 6              | Насос<br>нейтрализатора                                | 2                  | 11                       | -                          |
| 7              | Насос резервуара<br>перемешивания                      | 2                  | 16                       | -                          |
| 8              | Насос<br>технологического<br>конденсата                | 2                  | 5,5                      | -                          |
| 9              | Насос<br>технологического<br>пара                      | 2                  | 0,75                     | -                          |
| 10             | Насос<br>упариваемого<br>раствора первой<br>ступени    | 2                  | 0,75                     | -                          |
| 11             | Насос<br>упариваемого<br>раствора второй<br>ступени    | 2                  | 0,75                     | -                          |
| 12             | Насос<br>упариваемого<br>раствора третьей<br>ступени   | 2                  | 0,75                     | -                          |
| 13             | Насос<br>упариваемого<br>раствора четвертой<br>ступени | 2                  | 3                        | -                          |
| 14             | Система осушки<br>воздуха                              | 2                  | 5                        | -                          |
| 15             | Компрессор<br>воздушный<br>винтовой                    | 3                  | 5,5                      | -                          |

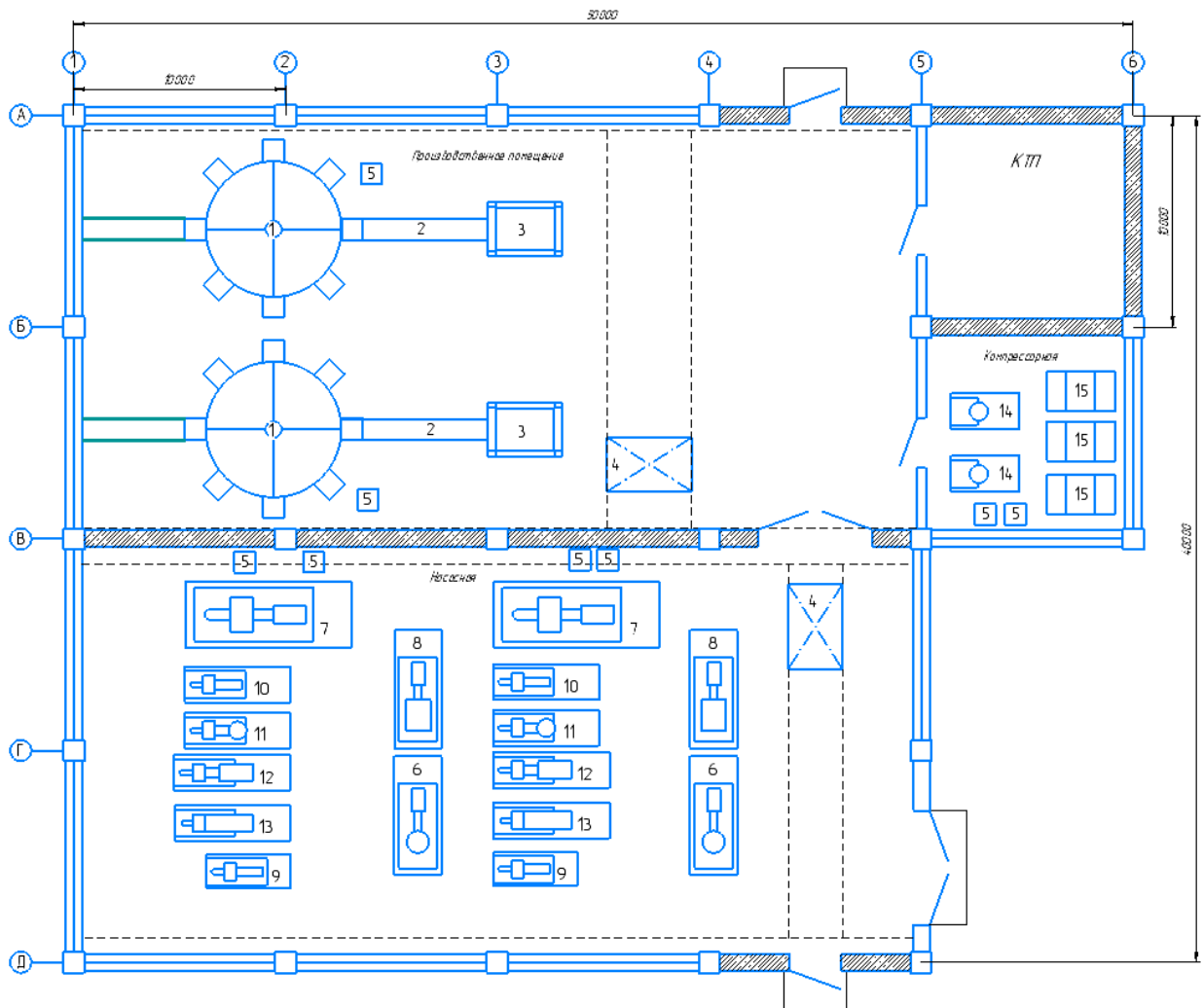


Рисунок 1 – План расположения оборудования на производстве

Вывод по разделу 1: собраны исходные данные об электрооборудовании, здании и внешней электросети производства.

## 2 Определение ожидаемых электрических нагрузок

Для получения значений электрических нагрузок производства, определим потребления от силовых электроприемников и освещения. Методика расчётов описана в [10] и [13].

### 2.1 Значение нагрузок от электрооборудования

В качестве примера произведём расчёт потребителей, подключенных к шкафу распределительному 1 (ШР1) (Таблица 2).

Остальные расчёты будут произведены и их результаты будут сведены в общую таблицу 3.

Таблица 2 - Потребители подключенные к ШР1 и их исходные данные

| Номер электроприемника на плане | Наименование            | Количество ЭП, n, шт. | Мощность одного ЭП, $P_{н.макс}$ кВт |
|---------------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| 1                               | Резервуар перемешивания | 1                     | 18,5                                 |
| 2                               | Конвейер ленточный      | 1                     | 15                                   |
| 3                               | Дозатор наполнителя     | 1                     | 4                                    |
| 5                               | Шкаф управления         | 1                     | 1                                    |

Для получения значения активной мощности подгрупп используем формулу (1):

$$P = P_{ном} \cdot n \quad (1)$$

$$P_1 = 18,5 \cdot 1 = 18,5 \text{ кВт}$$

$$P_2 = 15 \cdot 1 = 15 \text{ кВт}$$

$$P_3 = 4 \cdot 1 = 4 \text{ кВт}$$

$$P_5 = 1 \cdot 1 = 1 \text{ кВт}$$



Итого по ШР1 применим формулу (2):

$$P_{\text{ШР1}} = P_1 + P_2 + P_3 + P_5 \quad (2)$$
$$P_{\text{ШР1}} = 18,5 + 15 + 4 + 1 = 38,5 \text{ кВт}$$

По [10] определим коэффициенты использования и мощности для потребителя. Полученные данные сведём в таблицу 3.

Формула (3) позволит определить коэффициент силовой сборки:

$$m = \frac{P_{\text{н.макс}}}{P_{\text{н.мин}}} \quad (3)$$
$$m_{\text{ШР1}} = \frac{18,5}{1} = 18,5$$

Среднюю активную и реактивную мощности определим по следующим формулам (4)...(7):

$$P_{\text{ср}} = K_{\text{и}} \cdot P_{\text{н.}\Sigma}, \quad (4)$$
$$P_{\text{ср1}} = 0,7 \cdot 18,5 = 12,95 \text{ кВт}$$
$$P_{\text{ср2}} = 0,7 \cdot 15 = 10,5 \text{ кВт}$$
$$P_{\text{ср3}} = 0,7 \cdot 4 = 2,8 \text{ кВт}$$
$$P_{\text{ср5}} = 0,5 \cdot 1 = 0,5 \text{ кВт}$$
$$P_{\text{срШР1}} = P_{\text{ср1}} + P_{\text{ср2}} + P_{\text{ср3}} + P_{\text{ср5}} \quad (5)$$
$$P_{\text{срШР1}} = 12,95 + 10,5 + 2,8 + 0,5 = 26,75 \text{ кВт}$$

$$Q_{\text{ср}} = P_{\text{ср}} \cdot \text{tg}\varphi, \quad (6)$$
$$Q_{\text{ср1}} = 12,95 \cdot 0,88 = 11,4 \text{ квар,}$$
$$Q_{\text{ср2}} = 10,5 \cdot 0,88 = 9,24 \text{ квар,}$$
$$Q_{\text{ср3}} = 2,8 \cdot 0,88 = 2,46 \text{ квар,}$$
$$Q_{\text{ср5}} = 0,5 \cdot 1,33 = 0,67 \text{ квар,}$$

$$Q_{\text{срШР1}} = Q_{\text{ср1}} + Q_{\text{ср2}} + Q_{\text{ср3}} + Q_{\text{ср5}} \quad (7)$$

$$Q_{\text{срШР1}} = 11,4 + 9,24 + 2,46 + 0,67 = 23,77 \text{ квар}$$

Рассчитываем по формулам (8)...(10) коэффициент использования и значение  $\text{tg}\varphi_{\text{ср}}$  и  $\text{cos}\varphi_{\text{ср}}$ .

$$K_{\text{и.гр}} = \frac{\Sigma P_c}{\Sigma P_{\text{н.}\Sigma}}, \quad (8)$$

$$K_{\text{и.грШР1}} = \frac{26,75}{38,5} = 0,69$$

$$\text{cos}\varphi_{\text{ср}} = \frac{\Sigma P_c}{\Sigma S_c}, \quad (9)$$

$$\text{cos}\varphi_{\text{срШР1}} = \frac{26,75}{\sqrt{(38,5^2 + 23,77^2)}} = 0,75$$

$$\text{tg}\varphi_{\text{ср}} = \frac{\Sigma Q_c}{\Sigma P_c}, \quad (10)$$

$$\text{tg}\varphi_{\text{срШР1}} = \frac{23,77}{26,75} = 0,89$$

Эффективное число приемников и коэффициент максимума для активной и реактивной нагрузок определяем по методике [12].

«Рассчитываем значения активной и реактивной нагрузки электроприемников по формулам (11) и (12):

$$P_p = K_M \cdot \Sigma P_{\text{СМ}}, \quad (11)$$

$$P_{p\text{ШР1}} = 1,29 \cdot 26,75 \text{ кВт}$$

$$Q_p = K_M' \cdot \Sigma Q_{\text{СМ}}, \quad (12)$$

$$Q_{p\text{ШР1}} = 1,1 \cdot 23,77 = 26,14 \text{ квар}$$

Определяем полную расчётную нагрузку по формуле (13):

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}, \quad (13)$$

$$S_{p\text{ШР1}} = \sqrt{26,75^2 + 26,14^2} = 43,29 \text{ кВА}$$

Определяем расчётный ток для электроприемников рассчитываемого узла нагрузки по формуле (14):

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_H}, \quad (14)$$

$$I_p = \frac{43,29}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 65,77 \text{ А} \gg [10].$$

Проанализировав данные о состоянии системы освещения. Было решено, что оно соответствует нормам [3] и [9]. Поэтому не требует реконструкции. Схему можно увидеть на одном из чертежей. Значения активной и реактивной осветительных нагрузок:

$$P_{\text{осв.}} = 11,5 \text{ кВт};$$

$$Q_{\text{осв.}} = 4,22 \text{ кВар.}$$

## 2.2 Определение общих электрических нагрузок по производству

Суммируем полученные значения по каждой группе потребителей по формулам (15) и (16):

$$P_{P\Sigma} = P_{\text{ШР1}\Sigma} + P_{\text{ШР2}\Sigma} + P_{\text{ШР3}\Sigma} + P_{\text{ШР4}\Sigma} + P_{\text{ШР5}\Sigma} + P_{\text{ШОС}\Sigma}, \quad (15)$$

$$P_{P\Sigma} = 34,51 + 39,14 + 36,06 + 38,62 + 25,22 + 11,5 = 185,05 \text{ кВт}$$

$$Q_{P\Sigma} = Q_{\text{ШР1}\Sigma} + Q_{\text{ШР2}\Sigma} + Q_{\text{ШР3}\Sigma} + Q_{\text{ШР4}\Sigma} + Q_{\text{ШР5}\Sigma} + Q_{\text{ШОС}\Sigma}, \quad (16)$$

$$Q_{P\Sigma} = 26,14 + 29,84 + 23,7 + 24,15 + 16,77 + 4,22 = 124,82 \text{ квар}$$

«Находим полную суммарную нагрузку по формуле (17):

$$S_{\Sigma} = \sqrt{P_{P\Sigma}^2 + Q_{P\Sigma}^2}, \quad (17)$$

$$S_{\Sigma} = \sqrt{(185,05)^2 + (124,82)^2} = 223,2 \text{ кВА} \text{ [10].}$$

Используя формулу (18), рассчитаем суммарный ток:

$$I_{\Sigma} = \frac{S_{\Sigma}}{\sqrt{3} \cdot 0,38}, \quad (18)$$

$$I_{\Sigma} = \frac{223,2}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 339,12 \text{ А}$$

Вывод по разделу 2: произведены расчёты ожидаемых нагрузок на производстве. Для проведения расчётов были использованы данные, полученные в разделе 1.

Потребители предварительно сгруппированы по распределительным шкафам (ШР). Составлена сводная ведомость нагрузок (таблица 3) для подбора марки трансформатора в КТП.

При проведении расчётов был использован метод коэффициента спроса (использования). «Коэффициент спроса учитывает тот факт, что электроприемники не все работают одновременно и не все загружены на номинальную мощность.

Основной недостаток данного метода состоит в том, что величина коэффициента спроса принимается одинаковой для всех электроприемников. Такое допущение возможно только при высоких значениях коэффициентов использования и эффективного числа электроприемников.

Данный метод рекомендуется применять при отсутствии конкретных данных об электроприемниках, наличии их суммарной установленной мощности по цеху (участку) и общего характерного режима их работы» [10].

Таблица 3 – Сводная ведомость нагрузок по производству

| Номер на плане | Наименование<br>ЭП      | Количество, п.<br>шт. | Паспортные<br>$P_{н.макс}$ кВт | Общее<br>$P_{н.}$ кВт | $K_{н.}$ | $\cos\varphi$ | $tg\varphi$ | $P_c$ ,<br>кВт | $Q_c$ ,<br>квар | $m$ | $n_{\text{Э}}$ | $K_M$ | $P_p$ ,<br>кВт | $Q_{p,кв}$<br>ар | $S_p$ ,<br>кВА | $I_p$ , А |
|----------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|----------|---------------|-------------|----------------|-----------------|-----|----------------|-------|----------------|------------------|----------------|-----------|
| 1              | 2                       | 3                     | 4                              | 5                     | 6        | 7             | 8           | 9              | 10              | 11  | 12             | 13    | 14             | 15               | 16             | 17        |
| ШР1            |                         |                       |                                |                       |          |               |             |                |                 |     |                |       |                |                  |                |           |
| 1              | Резервуар перемешивания | 1                     | 18,5                           | 18,5                  | 0,7      | 0,75          | 0,88        | 12,95          | 11,4            | -   | -              | -     | -              | -                | -              | -         |
| 2              | Конвейер ленточный      | 1                     | 15                             | 15                    | 0,7      | 0,75          | 0,88        | 10,5           | 9,24            | -   | -              | -     | -              | -                | -              | -         |
| 3              | Дозатор наполнителя     | 1                     | 4                              | 4                     | 0,7      | 0,75          | 0,88        | 2,8            | 2,46            | -   | -              | -     | -              | -                | -              | -         |
| 5              | Шкаф управления         | 1                     | 1                              | 1                     | 0,5      | 0,6           | 1,33        | 0,5            | 0,67            | -   | -              | -     | -              | -                | -              | -         |
| Итого на ШР1:  |                         | 4                     | -                              | 38,5                  | 0,69     | 0,75          | 0,89        | 26,75          | 23,77           | 18  | 1              | 1,2   | 34,51          | 26,14            | 43,29          | 65,77     |
| ШР2            |                         |                       |                                |                       |          |               |             |                |                 |     |                |       |                |                  |                |           |
| 1              | Резервуар перемешивания | 1                     | 18,5                           | 18,5                  | 0,8      | 0,75          | 0,88        | 14,8           | 13,02           | -   | -              | -     | -              | -                | -              | -         |
| 2              | Конвейер ленточный      | 1                     | 15                             | 15                    | 0,8      | 0,75          | 0,88        | 12             | 10,56           | -   | -              | -     | -              | -                | -              | -         |
| 3              | Дозатор наполнителя     | 1                     | 4                              | 4                     | 0,7      | 0,75          | 0,88        | 2,8            | 2,46            | -   | -              | -     | -              | -                | -              | -         |
| 4              | Кран мостовой           | 1                     | 4                              | 2,4                   | 0,1      | 0,5           | 1,73        | 0,24           | 0,42            | -   | -              | -     | -              | -                | -              | -         |
| 5              | Шкаф управления         | 1                     | 1                              | 1                     | 0,5      | 0,6           | 1,33        | 0,5            | 0,67            | -   | -              | -     | -              | -                | -              | -         |
| Итого на ШР2:  |                         | 5                     | -                              | 40,9                  | 0,74     | 0,75          | 0,89        | 30,34          | 27,13           | 18, | 4,5            | 1,2   | 39,14          | 29,84            | 49,22          | 74,78     |

Продолжение таблицы 3

| 1             | 2                                     | 3  | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9     | 10    | 11    | 12   | 13   | 14    | 15    | 16    | 17    |
|---------------|---------------------------------------|----|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| ШРЗ           |                                       |    |      |      |      |      |      |       |       |       |      |      |       |       |       |       |
| 5             | Шкаф управления                       | 2  | 1    | 2    | 0,5  | 0,6  | 1,33 | 1     | 1,33  | -     | -    | -    | -     | -     | -     | -     |
| 6             | Насос нейтрализатора                  | 1  | 11   | 11   | 0,7  | 0,8  | 0,75 | 7,7   | 5,78  | -     | -    | -    | -     | -     | -     | -     |
| 7             | Насос резервуара перемешивания        | 1  | 16   | 16   | 0,7  | 0,8  | 0,75 | 11,2  | 8,40  | -     | -    | -    | -     | -     | -     | -     |
| 8             | Насос технологического конденсата     | 1  | 5,5  | 5,5  | 0,7  | 0,8  | 0,75 | 3,85  | 2,89  | -     | -    | -    | -     | -     | -     | -     |
| 9             | Насос технологического пара           | 1  | 0,75 | 0,75 | 0,7  | 0,8  | 0,75 | 0,53  | 0,39  | -     | -    | -    | -     | -     | -     | -     |
| 10            | Насос упариваемого раствора 1 ступени | 1  | 0,75 | 0,75 | 0,7  | 0,8  | 0,75 | 0,53  | 0,39  | -     | -    | -    | -     | -     | -     | -     |
| 11            | Насос упариваемого раствора 2 ступени | 1  | 0,75 | 0,75 | 0,7  | 0,8  | 0,75 | 0,53  | 0,39  | -     | -    | -    | -     | -     | -     | -     |
| 12            | Насос упариваемого раствора 3 ступени | 1  | 0,75 | 0,75 | 0,7  | 0,8  | 0,75 | 0,53  | 0,39  | -     | -    | -    | -     | -     | -     | -     |
| 13            | Насос упариваемого раствора 4 ступени | 1  | 3    | 3    | 0,7  | 0,8  | 0,75 | 2,1   | 1,58  | -     | -    | -    | -     | -     | -     | -     |
| Итого на ШРЗ: |                                       | 10 | -    | 40,5 | 0,69 | 0,79 | 0,77 | 27,95 | 21,54 | 21,33 | 4,94 | 1,29 | 36,06 | 23,70 | 43,15 | 65,55 |
| ШР4           |                                       |    |      |      |      |      |      |       |       |       |      |      |       |       |       |       |
| 4             | Кран мостовой                         | 1  | 4    | 2,4  | 0,1  | 0,5  | 1,73 | 0,24  | 0,42  | -     | -    | -    | -     | -     | -     | -     |

Продолжение таблицы 3

| 1                      | 2                                     | 3  | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9     | 10    | 11    | 12   | 13   | 14     | 15     | 16    | 17     |
|------------------------|---------------------------------------|----|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|--------|--------|-------|--------|
| 5                      | Шкаф управления                       | 2  | 1    | 2    | 0,5  | 0,6  | 1,33 | 1     | 1,33  | -     | -    | -    | -      | -      | -     | -      |
| 6                      | Насос нейтрализатора                  | 1  | 11   | 11   | 0,7  | 0,8  | 0,75 | 7,7   | 5,78  | -     | -    | -    | -      | -      | -     | -      |
| 7                      | Насос резервуара перемешивания        | 1  | 16   | 16   | 0,7  | 0,8  | 0,75 | 11,2  | 8,40  | -     | -    | -    | -      | -      | -     | -      |
| 8                      | Насос технологического конденсата     | 1  | 5,5  | 5,5  | 0,7  | 0,8  | 0,75 | 3,85  | 2,89  | -     | -    | -    | -      | -      | -     | -      |
| 9                      | Насос технологического пара           | 1  | 0,75 | 0,75 | 0,7  | 0,8  | 0,75 | 0,53  | 0,39  | -     | -    | -    | -      | -      | -     | -      |
| 10                     | Насос упариваемого раствора 1 ступени | 1  | 0,75 | 0,75 | 0,7  | 0,8  | 0,75 | 0,53  | 0,39  | -     | -    | -    | -      | -      | -     | -      |
| 11                     | Насос упариваемого раствора 2 ступени | 1  | 0,75 | 0,75 | 0,7  | 0,8  | 0,75 | 0,53  | 0,39  | -     | -    | -    | -      | -      | -     | -      |
| 12                     | Насос упариваемого раствора 3 ступени | 1  | 0,75 | 0,75 | 0,7  | 0,8  | 0,75 | 0,53  | 0,39  | -     | -    | -    | -      | -      | -     | -      |
| 13                     | Насос упариваемого раствора 4 ступени | 1  | 3    | 3    | 0,7  | 0,8  | 0,75 | 2,1   | 1,58  | -     | -    | -    | -      | -      | -     | -      |
| Итого на ШР4:          |                                       | 11 | -    | 42,9 | 0,66 | 0,79 | 0,78 | 28,19 | 21,96 | 21,33 | 5,44 | 1,37 | 38,62  | 24,15  | 45,55 | 69,21  |
| ШР5                    |                                       |    |      |      |      |      |      |       |       |       |      |      |        |        |       |        |
| 5                      | Шкаф управления                       | 2  | 1    | 2    | 0,5  | 0,6  | 1,33 | 1     | 1,33  | -     | -    | -    | -      | -      | -     | -      |
| 14                     | Система осушки воздуха                | 2  | 5    | 10   | 0,7  | 0,8  | 0,75 | 7     | 5,25  | -     | -    | -    | -      | -      | -     | -      |
| 15                     | Компрессор воздушный винтовой         | 3  | 5,5  | 16,5 | 0,7  | 0,8  | 0,75 | 11,55 | 8,66  | -     | -    | -    | -      | -      | -     | -      |
| Итого на ШР5:          |                                       | 7  | -    | 28,5 | 0,69 | 0,79 | 0,78 | 19,55 | 15,24 | 5,50  | 4,18 | 1,29 | 25,22  | 16,77  | 30,28 | 46,01  |
| Освещение:             |                                       | -  | -    | -    | -    | -    | -    | -     | -     | -     | -    | -    | 11,5   | 4,22   | 12,25 | 18,61  |
| Итого по производству: |                                       | -  | -    | -    | -    | -    | -    | -     | -     | -     | -    | -    | 185,04 | 124,82 | 223,2 | 339,12 |

### 3 Расчёт и выбор трансформаторов

Выбор трансформаторов основывается на полученных данных об потреблении производства (таблица 3):

$$P_{p\Sigma} = 185,04 \text{ кВт};$$

$$Q_{p\Sigma} = 124,82 \text{ квар};$$

$$S_{p\Sigma} = 223,2 \text{ кВА}.$$

«Электроприемники производства относятся к 1 категории надежности. Работа осуществляется в нормальной окружающей среде. Коэффициент загрузки принимаем  $K_3=0,7$ » [5]. Основываясь на этих данных, рассчитаем номинальную мощность производства по формуле (19):

$$S_{\text{ном}} = \frac{P_p}{K_3 \cdot N_T} \tag{19}$$
$$S_{\text{ном}} = \frac{185,04}{0,7 \cdot 2} = 132,17 \text{ кВА}$$

Рассмотрим два варианта:

- Трансформатор марки ТМГ-250/6. Количество: 2 шт.;
- Трансформатор марки ТМГ-160/6. Количество: 2 шт.

#### 3.1 Вариант 1

Это вариант ТМГ-250/6. В количестве двух штук.



Таблица 4 – Паспортные данные рассматриваемого трансформатора

| Марка     | $S_{\text{НОМ.Т}}, \text{кВА}$ | $U_{\text{НОМ.ОБМ.}}, \text{кВ}$ |     | $u_{\text{к}}, \%$ | $\Delta P_{\text{к}}, \text{кВт}$ | $\Delta P_{\text{х}}, \text{кВт}$ | $I_{\text{х}}, \%$ |
|-----------|--------------------------------|----------------------------------|-----|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| ТМГ-250/6 | 250                            | 6                                | 0,4 | 4,5                | 3,7                               | 0,74                              | 1,2                |

«Определим потери в трансформаторе по формуле (20) и (21):

$$\Delta P_{T\Sigma} = N_T \cdot (\Delta P_{\text{х}} + K_3^2 \cdot \Delta P_{\text{к}}), \quad (20)$$

$$\Delta P_{T\Sigma} = 2 \cdot (0,74 + 0,7^2 \cdot 3,7) = 5,11 \text{ кВт}$$

$$\Delta Q_{T\Sigma} = N_T \cdot (I_{\text{х}} + K_3^2 \cdot U_{\text{кз}}) \frac{S_{\text{н}}}{100}, \quad (21)$$

$$\Delta Q_{T\Sigma} = 2 \cdot (1,2 + 0,7^2 \cdot 4,5) \frac{250}{100} = 17,03 \text{ квар}$$

где  $N_T$  – количество трансформаторов;

$\Delta P_T$  – потери активной мощности трансформатора, кВт;

$\Delta Q_T$  – потери реактивной мощности трансформатора, квар» [10].

«Находим суммарную расчётную нагрузку производства с учётом потерь, используя формулы (22) и (23):

$$\Delta P_p = P_{P\Sigma} + P_{T\Sigma}, \quad (22)$$

$$\Delta P_p = 185,04 + 5,11 = 190,15 \text{ кВт}$$

$$\Delta Q_p = Q_{P\Sigma} + Q_{T\Sigma}, \quad (23)$$

$$\Delta Q_p = 124,82 + 17,03 = 141,85 \text{ квар}» [10].$$

«Найдём значение реактивной мощности в часы минимума по формуле (24):

$$Q_{\text{min}} = Q_p \cdot 0,5, \quad (24)$$

$$Q_{\text{min}} = 141,85 \cdot 0,5 = 70,93 \text{ квар}» [10].$$

«Рассчитаем значение реактивной мощности в часы максимума по формулам (25) и (26):

$$Q'_{э1} = Q_P - 0,7 \cdot Q_{сд}, \quad (25)$$

$$Q'_{э1} = 141,85 - 0,7 \cdot 0 = 141,85 \text{ квар}$$

$$Q''_{э1} = \alpha \cdot \Delta P_p, \quad (26)$$

$$Q''_{э1} = 0,28 \cdot 190,15 = 53,24 \text{ квар},$$

где  $\alpha = 0,28$ ;

$Q_{сд}=0$ » [10].

«Из-за пониженного напряжения в часы максимальных нагрузок принимаем меньшее из значений:  $Q_{э1} = 53,24$  квар» [10].

«Экономически обоснованные значения реактивной мощности в режиме наименьших нагрузок определим по формулам (27) и (28):

$$Q'_{э2} = Q_{min} + Q_k, \quad (27)$$

$$Q'_{э2} = 70,93 + 0 = 70,93 \text{ квар}$$

$$Q''_{э2} = Q_{min} - Q_{кД} = Q_{min} - (\Delta Q_p - Q_{э1}), \quad (28)$$

$$Q''_{э2} = 70,93 - (141,85 - 53,24) = -17,68 \text{ квар}$$

где  $Q_k = 0$ » [10].

«Из-за повышенного напряжения в часы минимальных нагрузок принимаем большее из значений:  $Q_{э2} = 70,93$  квар.

Определяем суммарную мощность компенсирующих устройств по формулам (29) и (30):

$$Q_{ку.max} = 1,1 \cdot Q_p + Q_{э1} \quad (29)$$

$$Q_{ку.max} = 1,1 \cdot 141,85 + 53,24 = 209,28 \text{ квар}$$

$$Q_{ку.min} = Q_{min} - Q_{э2} \quad (30)$$

$$Q_{\text{ку.min}} = 70,93 - 70,93 = 0 \text{ [10].}$$

«Используемые компенсирующие устройства должны быть регулируемые. Компенсация реактивной мощности не требуется между сетью 6 кВ и сетью до 1 кВ» [10].

«Определяем значения компенсации по формуле (31):

$$Q_{\text{эН}} = Q_{\text{э1}} - (Q_{\text{р}} - Q_{\text{р}\Sigma}) \quad (31)$$

$$Q_{\text{эН}} = 53,24 - (141,85 - 124,82) = 36,21 \text{ квар} \text{ [10].}$$

«Реактивная мощность, которая должна быть передана из сети 6 кВ в сеть напряжением до 1кВ, определяется по формуле (32):

$$Q_{\text{Т}} = \sqrt{(N_{\text{Т}} \cdot K_{\text{з}} \cdot S_{\text{Н}})^2 - P_{\text{P}\Sigma}^2} \quad (32)$$

$$Q_{\text{Т}} = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 250)^2 - 185,04^2} = 297,09 \text{ квар} \text{ [10].}$$

«Мощность КУ, которые установлены на стороне до 1 кВ рассчитаем по формуле (33):

$$Q_{\text{КУ.Н}} = Q_{\text{р}\Sigma} - Q_{\text{Т}} \quad (33)$$

$$Q_{\text{КУ.Н}} = 124,82 - 297,09 = -172,27 \text{ квар} \text{ [10].}$$

«Реактивная мощность не превышает 50 квар. Установка конденсаторной установки не требуется. Мощность компенсирующих устройств, которые могут быть установлены на стороне 6 кВ, рассчитаем по формуле (34):

$$Q_{\text{КУ.В}} = Q_{\text{ку.max}} - Q_{\text{КУ.Н}} \quad (34)$$

$$Q_{\text{КУ.В}} = 209,28 - (-172,27) = 381,55 \text{ квар} \text{ [10].}$$

«По полученным данным установка компенсирующего устройства на стороне 6 кВ нецелесообразна. Реактивная мощность не превышает 800 квар» [10].

«Затраты на установку КТП с трансформатором ТМГ-250/6 находим используя формулы (35)...(40):

$$C \cdot \Delta P_{\text{T}} = C_0 \cdot \Delta P_{\text{ХХ}} + C \cdot K_3^2 \cdot \Delta P_{\text{кз}}, \quad (35)$$

$$C \cdot \Delta P_{\text{T}} = 269,69 \cdot 0,74 + 88,86 \cdot 0,7^2 \cdot 3,7 = 0,36 \text{ тыс. руб.},$$

$$Z_{\text{КТП}} = E \cdot K_{\text{ТП}} + C \cdot \Delta P_{\text{T}}, \quad (36)$$

$$Z_{\text{КТП}} = 0,223 \cdot 272 \cdot 2 + 0,36 \cdot 2 = 122,03 \text{ тыс. руб.},$$

где  $K_{\text{ТП}}$  – стоимость одной КТП,  $K_{\text{ТП}}=272$  тыс. руб.;

$C$  – удельная стоимость максимальных активных потерь;

$C_0$  – удельная стоимость потерь х.х. трансформатора» [10].

$$C = \left( \frac{\alpha}{T_{\text{М}}} + \beta \cdot 10^{-2} \right) \cdot \tau, \quad (37)$$

$$C = \left( \frac{125,49}{4500} + 0,29 \cdot 10^{-2} \right) \cdot 2886,21 = 88,86 \text{ руб./кВт} \cdot \text{год},$$

$$C_0 = \left( \frac{\alpha}{T_{\text{М}}} + \beta \cdot 10^{-2} \right) \cdot T_{\text{р}}, \quad (38)$$

$$C_0 = \left( \frac{125,49}{4500} + 2,9 \cdot 10^{-2} \right) \cdot 8760 = 269,69 \text{ руб./кВт} \cdot \text{год},$$

где  $\alpha$  – основная ставка двухставочного тарифа, равная 125,49 руб/кВт;

$\beta$  – плата за 1 кВт·час электроэнергии, равная 2,9 р/кВт · час;

$T_{\text{р}}$  – время работы трансформатора в году, равное 8760 ч;

$T_{\text{М}}$  – время использования максимальной нагрузки предприятия в год, равное 4500 ч;

$\tau$  – время максимальных потерь» [10].

$$\tau = \left( 0,124 + \frac{T_{\text{М}}}{10000} \right)^2 \cdot T_{\text{р}} \quad (39)$$

$$\tau = \left(0,124 + \frac{4500}{10000}\right)^2 \cdot 8760 = 2886,21 \text{ ч.}$$

Общие затраты:

$$Z_{\text{общие}} = Z_{\text{ст}} \quad (40)$$

$$Z_{\text{общие}} = 122,03 \text{ тыс. руб}$$

### 3.2 Вариант 2

Это вариант ТМГ-160/6. В количестве двух штук.

Таблица 5 – Паспортные данные рассматриваемого трансформатора

| Марка     | $S_{\text{ном.Т}}$ , кВА | $U_{\text{ном. обм.}}$ , кВ |     | $u_k$ , % | $\Delta P_k$ , кВт | $\Delta P_x$ , кВт | $I_x$ , % |
|-----------|--------------------------|-----------------------------|-----|-----------|--------------------|--------------------|-----------|
| ТМГ-160/6 | 160                      | 6                           | 0,4 | 4,7       | 2,65               | 0,44               | 1,9       |

«Определим потери в трансформаторе по формуле (41) и (42):

$$\Delta P_{T\Sigma} = N_T \cdot (P_{xx} + K_3^2 \cdot P_{k3}), \quad (41)$$

$$\Delta P_{T\Sigma} = 2 \cdot (0,44 + 0,7^2 \cdot 2,65) = 3,48 \text{ кВт}$$

$$\Delta Q_{T\Sigma} = N_T \cdot (I_x + K_3^2 \cdot u_k) \frac{S_H}{100}, \quad (42)$$

$$\Delta Q_{T\Sigma} = 2 \cdot (1,9 + 0,7^2 \cdot 4,7) \frac{160}{100} = 13,45 \text{ квар,}$$

где  $N_T$  – количество трансформаторов;

$\Delta P_T$  – потери активной мощности трансформатора, кВт;

$\Delta Q_T$  – потери реактивной мощности трансформатора, квар» [10].

«Находим расчётную нагрузку производства с учётом потерь используя формулы (43) и (44):

$$\Delta P_p = P_{P\Sigma} + P_{T\Sigma}, \quad (43)$$

$$\Delta P_p = 185,05 + 3,48 = 188,53 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_p = Q_{P\Sigma} + Q_{T\Sigma}, \quad (44)$$

$$\Delta Q_p = 124,82 + 13,45 = 138,27 \text{ квар} \gg [10].$$

«Формула для расчета реактивной мощности в часы минимальной нагрузки определяется по формуле (45):

$$Q_{min} = Q_p \cdot 0,5, \quad (45)$$

$$Q_{min} = 138,27 \cdot 0,5 = 69,14 \text{ квар} \gg [10].$$

«Максимальное значение определим по формуле (46):

$$Q'_{\varepsilon 1} = Q_p - 0,7 \cdot Q_{сд}, \quad (46)$$

$$Q'_{\varepsilon 1} = 138,27 - 0,7 \cdot 0 = 138,27 \text{ квар}$$

$$Q''_{\varepsilon 1} = \alpha \cdot P_p, \quad (47)$$

$$Q''_{\varepsilon 1} = 0,28 \cdot 188,53 = 52,79 \text{ квар},$$

где  $\alpha = 0,28$ ;

$$Q_{сд}=0 \gg [10].$$

«Так как во время максимальной загруженности значения низкие, мы принимаем меньшее из значений:  $Q_{\varepsilon 1} = 52,79$  квар.

Экономически обоснованные значения реактивной мощности в режиме наименьших нагрузок вычисляем по формулам (48) и (49):

$$Q'_{\varepsilon 2} = Q_{min} + Q_k \quad (48)$$

$$Q'_{\varepsilon 2} = 69,14 + 0 = 69,14 \text{ квар}$$

$$Q''_{\varepsilon 2} = Q_{min} - Q_{кД} = Q_{min} - (Q_p - Q_{\varepsilon 1}) \quad (49)$$

$$Q''_{\varepsilon 2} = 69,14 - (138,27 - 52,79) = -16,34 \text{ квар}$$

где  $Q_k = 0$ » [10].

«Так как при минимальной загруженности напряжение повышено, выбираем большее из значений:  $Q_{э2}=69,14$  квар.

Находим суммарную мощность компенсирующих устройств используя формулы (50)...(52):

$$Q_{ку.мах} = 1,1 \cdot Q_p + Q_{э1} \quad (50)$$

$$Q_{ку.мах} = 1,1 \cdot 138,27 + 52,79 = 204,89 \text{ квар}$$

$$Q_{ку.мин} = Q_{мин} - Q_{э2} \quad (51)$$

$$Q_{ку.мин} = 69,14 - 69,14 = 0$$

$$Q_{эН} = Q_{э1} - (Q_p - Q_{p\Sigma}) \quad (52)$$

$$Q_{эН} = 52,79 - (138,27 - 124,82) = 39,34 \text{ квар} \text{» [10].}$$

«Реактивная мощность из сети 6 кВ в сеть до 1кВ рассчитывается формулой (53):

$$Q_T = \sqrt{(N_T \cdot K_3 \cdot S_H)^2 - P_{P\Sigma}^2} \quad (53)$$

$$Q_T = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 160)^2 - 185,04^2} = 126,24 \text{ квар} \text{» [10].}$$

«Мощность КУ, устанавливаемых на стороне до 1 кВ, определяется по формуле (54):

$$Q_{КУ.Н} = Q_{p\Sigma} - Q_T \quad (54)$$

$$Q_{КУ.Н} = 124,82 - 126,24 = -1,42 \text{ квар} \text{» [10].}$$

«Реактивная мощность не выше 50 квар.

Рассчитаем мощность компенсирующих устройств, которые можно установить на стороне 6 кВ, используя формулу (55):

$$Q_{\text{КУ.В}} = Q_{\text{КУ.маx}} - Q_{\text{КУ.н}} \quad (55)$$

$$Q_{\text{КУ.В}} = 204,89 - (-1,42) = 206,31 \text{ квар} \gg [10].$$

«Можно не устанавливать компенсирующее устройство, потому что реактивная мощность меньше 800 квар.

Затраты на установку КТП с трансформатором ТМГ-160/6 вычисляем по формулам (56)...(61):

$$C \cdot \Delta P_T = C_0 \cdot \Delta P_{\text{ХХ}} + C \cdot K_3^2 \cdot \Delta P_{\text{КЗ}}, \quad (56)$$

$$C \cdot \Delta P_T = 269,69 \cdot 0,44 + 88,86 \cdot 0,7^2 \cdot 2,65 = 0,234 \text{ тыс. руб.},$$

$$Z_{\text{КТП}} = E \cdot K_{\text{ТП}} + C \cdot \Delta P_T, \quad (57)$$

$$Z_{\text{КТП}} = 0,223 \cdot 203 \cdot 2 + 0,36 \cdot 2 = 91,26 \text{ тыс. руб.},$$

где  $K_{\text{ТП}}$  - стоимость одной КТП,  $K_{\text{ТП}}=203$  тыс. руб.;

$C$  – удельная стоимость максимальных активных потерь;

$C_0$  – удельная стоимость потерь х.х. трансформатора» [10].

$$\ll C = \left( \frac{\alpha}{T_M} + \beta \cdot 10^{-2} \right) \cdot \tau, \quad (58)$$

$$C = \left( \frac{125,49}{4500} + 0,29 \cdot 10^{-2} \right) \cdot 2886,21 = 88,86 \text{ руб/кВт} \cdot \text{год},$$

$$C_0 = \left( \frac{\alpha}{T_M} + \beta \cdot 10^{-2} \right) \cdot T_p, \quad (59)$$

$$C_0 = \left( \frac{125,49}{4500} + 0,29 \cdot 10^{-2} \right) \cdot 8760 = 269,69 \text{ руб/кВт} \cdot \text{год},$$

где  $\alpha$  – основная ставка двухставочного тарифа, равная 125,49 руб/кВт;

$\beta$  – дополнительная плата за 1 кВт·час электроэнергии, равная 2,9 р/кВт · час;

$T_p$  – время работы трансформатора в году, равное 8760 ч;

$T_M$  – время использования максимальной нагрузки предприятия в год, равное 4500 ч.;

$\tau$  – время максимальных потерь.



$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_M}{10000}\right)^2 \cdot T_p \quad (60)$$

$$\tau = \left(0,124 + \frac{4500}{10000}\right)^2 \cdot 8760 = 2886,21 \text{ ч.} \text{ [10].}$$

«Общие затраты:

$$Z_{\text{общие}} = Z_{\text{ст}} \quad (61)$$

$$Z_{\text{общие}} = 91,26 \text{ тыс. руб} \text{ [10].}$$

Вывод по разделу 3: произведя расчёты потерь трансформаторов и экономических затрат предварительно выбранных вариантов, было определено, что целесообразнее использование комплектной трансформаторной подстанции с двумя трансформаторами марки ТМГ-160/6. Это связано с тем, что общие затраты на 2 вариант с ТМГ-160/6 на 31 тыс. руб. дешевле.

Для обоих вариантов был произведен расчёт по использованию компенсирующих устройств реактивной мощности. Результаты расчётов показали, что установка вышеописанного устройства не требуется.

#### **4 Выбор и обоснование схемы производственного электроснабжения**

Для выбора схемы производственного электроснабжения дополнительно изучены иностранные источники [16], [17], [18], [19], [20]. Из этих источников был получен зарубежный опыт реализации электроснабжения производственных объектов.

В качестве схемы электроснабжения производства выбран тип радиальный. Выбор основан на том, что потребители на производстве групповые трехфазные, расположение которых неравномерно на территории.

Система 380/220 В будет выполнена с глухозаземленной нейтралью трансформатора с пятипроводной электрической сетью.

В данном проекте питание производства осуществляется кабельными вводами. Трансформатор защищен от токов КЗ, автоматическим выключателем.

КТП (комплектная трансформаторная подстанция) соединена с несколькими РП (ШР1, ШР2, ШР3, ШР4, ШР5 и ШО). От распределительных шкафов через аппараты защиты отходят питающие проводники к ЭП.

Разработана однолинейная схема производственной сети 0,4 кВ. Данная схема представлена на одном из чертежей А1. Схема выполнена согласно единой системе конструкторской документации [6].

Составлена расчётная схема подключения одного из электроприемников на производстве.

По расчётной схеме составлена схема замещения. Схема будет использована при расчётах токов коротких замыканий.

Вывод по разделу 4: определен тип внутренней схемы электроснабжения. Разработаны расчётные и однолинейные схемы.

## 5 Выбор оборудования внутрицеховой сети

Предварительный подбор проводников, трансформаторов тока и автоматических выключателей будет основан на данных, сведенных в таблицу 3 и разработанной схеме подключения электроприемников. Без этих данных системы расчёт токов короткого замыкания будет не полный.

### 5.1 Выбор кабельных линий

«Определяем номинальный рабочий ток:

От КТП до ШР1:

$$I_p = \frac{34,51}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 52,43 \text{ А}$$

Выбираем кабель ВБбШнг(А) 5×16. Для остальных ШР сечение аналогично рассчитано и занесено в таблицу 6» [10]. Выбираем кабели для питания каждого электроприемника по формуле (62):

$$I_p = \frac{P_{\text{пасп.}}}{\sqrt{3} \cdot U_d \cdot n_d} \quad (62)$$

где  $U_d$  – номинальное напряжение электроприемника, кВ;

$n_d$  – КПД электроприемника.

Резервуар перемешивания:

$$I_p = \frac{18,5}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,6} = 46,85 \text{ А}$$

Выбираем кабель ВБбШнг(А) 5×10. Для остальных кабелей сечение аналогично рассчитано и занесено в таблицу 6.

## 5.2 Выбор автоматических выключателей

Рассмотрим выбор на участке от КТП до ШР1:

$$I_p = \frac{34,51}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 52,43 \text{ А}$$

Выбираем автоматический выключатель типа ВА-СЭЩ-TS100 с теплоэлектромагнитным расцепителем серии FMU. Номинальным ток расцепителя 63 А.

Для остальных ШР аналогично произведен выбор и результаты занесены в таблицу 6. В качестве примера выбор автоматических выключателей для электроприемников произведём расчёт для резервуара перемешивания:

$$I_p = \frac{18,5}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,6} = 46,85 \text{ А}$$

Выбираем автоматический выключатель типа ВА-СЭЩ-TS100 серии FMU. Ток расцепителя 50 А. Для остальных ЭП произведен выбор и результаты занесены в таблицу 6.

## 5.3 Выбор измерительного трансформатора тока

В качестве примера рассмотрим выбор от КТП до ШР1:

$$I_p = \frac{34,51}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 52,43 \text{ А}$$

Выбираем трансформатор тока типа ТШП-0,66-75/5.

Для остальных ШР аналогично произведен выбор и результаты занесены в таблицу 6.

Таблица 6 – Результаты предварительного выбора

| Участок                                       | Проводник       | Автоматический выключатель | Трансформатор тока |
|---|-----------------|----------------------------|--------------------|
| От КТП до ШР1                                 | ВБбШнг(А) 5×16  | ВА-СЭЩ-TS100 63 А          | ТШП-0,66-75/5      |
| От КТП до ШР2                                 | ВБбШнг(А) 5×25  | ВА-СЭЩ-TS100 80 А          | ТШП-0,66-75/5      |
| От КТП до ШР3                                 | ВБбШнг(А) 5×16  | ВА-СЭЩ-TS100 63 А          | ТШП-0,66-75/5      |
| От КТП до ШР4                                 | ВБбШнг(А) 5×16  | ВА-СЭЩ-TS100 63 А          | ТШП-0,66-75/5      |
| От КТП до ШР5                                 | ВБбШнг(А) 5×10  | ВА-СЭЩ-TS100 50 А          | ТШП-0,66-60/5      |
| Резервуар перемешивания                       | ВБбШнг(А) 5×10  | ВА-СЭЩ-TS100 50 А          | -                  |
| Конвейер ленточный                            | ВБбШнг(А) 5×4   | ВА47-29 4.5кА 25А С        | -                  |
| Дозатор наполнителя                           | ВБбШнг(А) 5×1,5 | ВА47-29 4.5кА 10А С        | -                  |
| Кран мостовой                                 | ВБбШнг(А) 5×1,5 | ВА47-29 4.5кА 10А С        | -                  |
| Шкаф управления                               | ВБбШнг(А) 5×1,5 | ВА47-29 4.5кА 10А С        | -                  |
| Насос нейтрализатора                          | ВБбШнг(А) 5×2,5 | ВА47-29 4.5кА 16А С        | -                  |
| Насос резервуара перемешивания                | ВБбШнг(А) 5×4   | ВА47-29 4.5кА 25А С        | -                  |
| Насос технологического конденсата             | ВБбШнг(А) 5×1,5 | ВА47-29 4.5кА 10А С        | -                  |
| Насос технологического пара                   | ВБбШнг(А) 5×1,5 | ВА47-29 4.5кА 10А С        | -                  |
| Насос упариваемого раствора первой ступени    | ВБбШнг(А) 5×1,5 | ВА47-29 4.5кА 10А С        | -                  |
| Насос упариваемого раствора второй ступени    | ВБбШнг(А) 5×1,5 | ВА47-29 4.5кА 10А С        | -                  |
| Насос упариваемого раствора третьей ступени   | ВБбШнг(А) 5×1,5 | ВА47-29 4.5кА 10А С        | -                  |
| Насос упариваемого раствора четвертой ступени | ВБбШнг(А) 5×1,5 | ВА47-29 4.5кА 10А С        | -                  |
| Система осушки воздуха                        | ВБбШнг(А) 5×1,5 | ВА47-29 4.5кА 10А С        | -                  |
| Компрессор воздушный винтовой                 | ВБбШнг(А) 5×1,5 | ВА47-29 4.5кА 10А С        | -                  |

Вывод по разделу 5: произведен предварительный выбор кабельных линий, автоматических выключателей и трансформаторов тока. Результаты сведены в таблицу 6.

## **6 Выбор комплектной трансформаторной подстанции**

Распределительным центром основного питания будет КТП. На территории объекта есть рабочая площадь, подходящая под КТП. Подберём необходимое оборудование КТП.

«Проанализировав различных производителей комплектных трансформаторных подстанций, была выбрана продукция компании «Электроцит» г. Чехов» [15].

В КТП будет получать питание через два ввода: основной и резервный. Это связано с тем, производство является потребителем первой категории.

По результатам расчётов экономической целесообразности (раздел 3), определена марка устанавливаемых трансформаторов. Ими являются трансформаторы ТМГ 160/6/0,4.

«В комплект КТП будут входить следующие шкафы производителя «Электроцит» г. Чехов:

- Шкаф УВН-1 (Устройство ввода высокого напряжения);
- Шкаф ШНВ-7 (Шкаф низковольтный вводной);
- Шкаф ШНЛ-1 (Шкаф низковольтный линейный);
- Шкаф ШНС-6 (Шкаф низковольтный секционный).

Шкафы УВН укомплектованы выключателями нагрузки ВНАП-10/400 20зпУ2 и предохранителями ПКТ-102-10-50-8-У3.

Шкафы ШНВ оборудованы автоматическим выключателем, амперметрами, вольтметрами, трансформаторами тока.

Шкафы ШНЛ имеют шесть линий питания на каждой, из которой установлены автоматические выключатели, трансформаторы тока и амперметры 0...200 или 0...600 А в зависимости от линии.

Шкаф ШНС оборудован рубильником серии РЕ19 и автоматическим выключателем» [15].

Вывод по разделу 6: подобрано КТП для производства.

## 7 Значение токов коротких замыканий на различных участках

Чтобы рассчитать токи КЗ воспользуемся данными по методике из источников [1], [2] и [16].

По данным из схемы (рисунок 2, 3), короткие замыкания будут рассчитаны в трёх точках: К1 (контакты распределительного устройства), К2 – на контакты ШР, К3 – контакты самого энергопотребляемого электроприёмника.

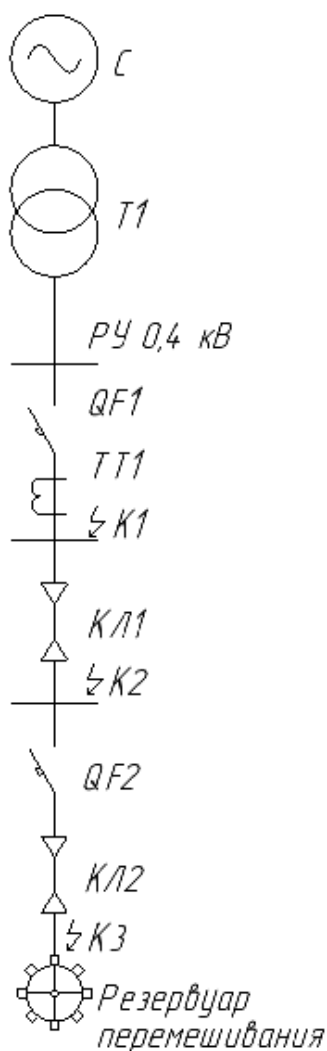


Рисунок 2 – Электрическая схема

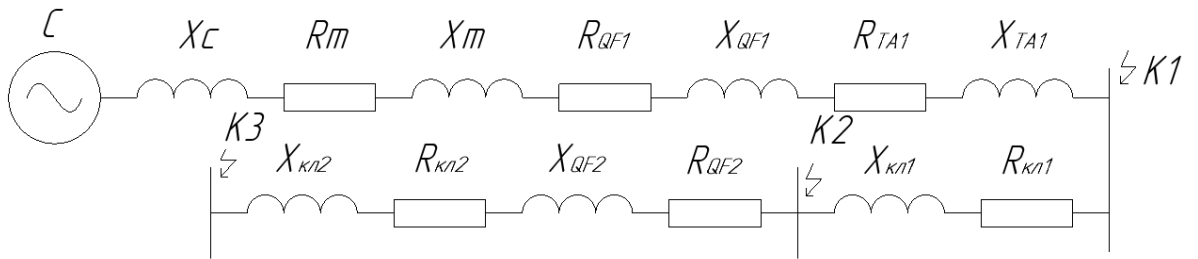


Рисунок 3 – Схема замещения по рисунку 2

### 7.1 Данные из расчётной схемы

Расчёт в системе производим по формуле (63):

$$X_c = \frac{(U_{СТНН})^2}{3 \cdot I_{ОТКЛ.НОМ.} \cdot U_{ВН}} \cdot 10^{-3} \quad (63)$$

$$X_c = \frac{(400)^2}{3 \cdot 65 \cdot 6,3} \cdot 10^{-3} = 0,13 \text{ МОм}$$

«Трансформатор ТМГ-160/6:

$$R_T = 16,6 \text{ МОм};$$

$$X_T = 41,7 \text{ МОм};$$

$$R_{0T} = 19,3 \text{ МОм};$$

$$X_{0T} = 43 \text{ МОм} \rangle [10].$$

«Выключатель ВА-СЭЩ-TS100-63А:

$$I_H = 63 \text{ А};$$

$$R_{AB1} = 2,4 \text{ МОм};$$

$$X_{AB1} = 2 \text{ МОм} \rangle [10].$$

«Выключатель ВА-СЭЩ-TS100-50А:

$$I_H = 50 \text{ А};$$

$$R_{AB2} = 5,5 \text{ МОм};$$

$$X_{AB2} = 4,5 \text{ МОм} \rangle [10].$$



«Кабельная линия КЛ1:

Кабель ВБбШнг(А)-LS – 5×16;

$l = 12$  м;

$R_{уд} = 1,16$  мОм/м;

$X_{уд} = 0,095$  мОм/м» [10].

$$\ll R_{кл1} = l \cdot R_{уд} \tag{64}$$

$$R_{кл1} = 12 \cdot 1,16 = 13,92 \text{ мОм}$$

$$X_{кл1} = l \cdot X_{уд} \tag{65}$$

$$X_{кл1} = 12 \cdot 0,095 = 1,14 \text{ мОм} \gg [10].$$

«Кабельная линия КЛ2:

кабель ВБбШнг(А)-LS – 5x10;

$l = 22$  м

$R_{уд} = 1,84$  мОм/м;

$X_{уд} = 0,099$  мОм/м

$$R_{кл2} = l \cdot R_{уд} \tag{66}$$

$$R_{кл2} = 22 \cdot 1,84 = 40,48 \text{ мОм}$$

$$X_{кл2} = l \cdot X_{уд} \tag{67}$$

$$X_{кл2} = 22 \cdot 0,099 = 2,2 \text{ мОм} \gg [10].$$

«Трансформатор тока ТШП-0,66-75/5:

$R_{ТА1} = 3$  мОм/м;

$X_{ТА1} = 4,8$  мОм/м» [10].

## 7.2 Расчёт токов коротких замыканий

### 7.2.1 Трёхфазное КЗ

Расчёт сопротивлений до точки К1 по формулам (68) ... (70):

$$R_{\Sigma K1} = R_T + R_{AB1} + R_{TA1} \quad (68)$$

$$R_{\Sigma K1} = 16,6 + 2,4 + 3 = 22 \text{ мОм}$$

$$X_{\Sigma K1} = X_C + X_T + X_{AB1} + X_{TA1} \quad (69)$$

$$X_{\Sigma K1} = 0,13 + 41,7 + 2 + 4,8 = 48,63 \text{ мОм}$$

$$Z_{\Sigma K1} = \sqrt{R_{\Sigma K1}^2 + X_{\Sigma K1}^2} \quad (70)$$

$$Z_{\Sigma K1} = \sqrt{22^2 + 48,63^2} = 53,38 \text{ мОм}$$

Ток трёхфазного металлического короткого замыкания рассчитываем по формуле (71):

$$I_{K1}^{(3)} = \frac{U_{HНН}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K1}} \quad (71)$$

$$I_{K1}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 53,38} = 4,32 \text{ кА}$$

Для определения дугового 3-х фазного КЗ используем формулы (72) и (73):

$$Z_{\Sigma K1} \Rightarrow 53,38 \text{ мОм } K_{c1} = 0,81; K_{c2} = 0,73$$

$$I_{KD}^{(3)} = I_{K1}^{(3)} \cdot K_{C1} \quad (72)$$

$$I_{KD}^{(3)} = 4,32 \cdot 0,81 = 3,5 \text{ кА}$$

$$I_{KM}^{(3)} = I_{K1}^{(3)} \cdot K_{C2} \quad (73)$$

$$I_{KM}^{(3)} = 4,32 \cdot 0,73 = 3,15 \text{ кА}$$

Ударный ток определяем по формуле (74):

$$\frac{R_{\Sigma K1}}{X_{\Sigma K1}} = \frac{22}{48,63} = 2,21 \Rightarrow K_{y K1} = 1,26$$
$$i_{y K1} = \sqrt{2} \cdot K_{y K1} \cdot I_{K1}^{(3)} \quad (74)$$
$$i_{y K1} = \sqrt{2} \cdot 1,26 \cdot 4,32 = 7,7 \text{ кА}$$

Для произведения расчёта в точке К2 используем формулы (75) ... (77):

$$R_{\Sigma K2} = R_{\Sigma K1} + R_{KL1} \quad (75)$$

$$R_{\Sigma K2} = 22 + 13,92 = 35,92 \text{ мОм}$$

$$X_{\Sigma K2} = X_{\Sigma K1} + X_{KL1} \quad (76)$$

$$X_{\Sigma K2} = 48,63 + 1,14 = 49,77 \text{ мОм}$$

$$Z_{\Sigma K2} = \sqrt{R_{\Sigma K2}^2 + X_{\Sigma K2}^2} \quad (77)$$

$$Z_{\Sigma K2} = \sqrt{35,92^2 + 49,77^2} = 61,38 \text{ мОм}$$

Ток трехфазного металлического КЗ рассчитаем по формуле (78):

$$I_{K2}^{(3)} = \frac{U_{H H H}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K2}} \quad (78)$$

$$I_{K2}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 61,38} = 3,76 \text{ кА}$$

Для нахождения дугового трехфазного КЗ используем формулы (79)...(80):

$$Z_{\Sigma K2} = 61,38 \text{ мОм} \Rightarrow K_{c1} = 0,82 ; K_{c2} = 0,75$$

$$I_{KD}^{(3)} = I_{K2}^{(3)} \cdot K_{C1} \quad (79)$$

$$I_{\text{КД}}^{(3)} = 3,76 \cdot 0,82 = 3,08 \text{ кА}$$

$$I_{\text{КМ}}^{(3)} = I_{\text{К2}}^{(3)} \cdot K_{\text{С2}} \quad (80)$$

$$I_{\text{КМ}}^{(3)} = 3,76 \cdot 0,75 = 2,82 \text{ кА}$$

Ударный ток находим по формуле (81):

$$\frac{R_{\Sigma\text{К2}}}{X_{\Sigma\text{К2}}} = \frac{35,92}{49,77} = 0,72 \Rightarrow K_{y\text{К2}} = 1,08$$

$$i_{y\text{К2}} = \sqrt{2} \cdot K_{y\text{К2}} \cdot I_{\text{К2}}^{(3)} \quad (81)$$

$$i_{y\text{К2}} = \sqrt{2} \cdot 1,08 \cdot 3,76 = 5,74 \text{ кА}$$

Расчёт в точке К3 производим по формулам (82)...(84):

$$R_{\Sigma\text{К3}} = R_{\Sigma\text{К2}} + R_{\text{АВ2}} + R_{\text{КЛ2}} \quad (82)$$

$$R_{\Sigma\text{К3}} = 35,92 + 5,5 + 40,48 = 81,9 \text{ мОм}$$

$$X_{\Sigma\text{К3}} = X_{\Sigma\text{К2}} + X_{\text{АВ2}} + X_{\text{КЛ2}} \quad (83)$$

$$X_{\Sigma\text{К3}} = 48,63 + 4,5 + 2,2 = 55,33 \text{ мОм}$$

$$Z_{\Sigma\text{К3}} = \sqrt{R_{\Sigma\text{К3}}^2 + X_{\Sigma\text{К3}}^2} \quad (84)$$

$$Z_{\Sigma\text{К3}} = \sqrt{81,9^2 + 55,33^2} = 98,84 \text{ мОм}$$

Ток металлического К3 рассчитываем, применяя формулу (85):

$$I_{\text{К3}}^{(3)} = \frac{U_{\text{Н НН}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\text{К3}}} \quad (85)$$

$$I_{\text{К3}}^{(3)} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 98,84} = 2,22 \text{ кА}$$

Дуговое 3-х фазное К3 определяем по формулам (86) и (87):

$$Z_{\Sigma K3} = 98,84 \text{ мОм} \Rightarrow K_{c1} = 0,87; K_{c2} = 0,78$$

$$I_{KD}^{(3)} = I_{K3}^{(3)} \cdot K_{c1} \quad (86)$$

$$I_{KD}^{(3)} = 2,22 \cdot 0,87 = 1,93 \text{ кА}$$

$$I_{KM}^{(3)} = I_{K3}^{(3)} \cdot K_{c2} \quad (87)$$

$$I_{KM}^{(3)} = 2,22 \cdot 0,78 = 1,73 \text{ кА}$$

Находим ударный ток по формуле (88):

$$\frac{X_{\Sigma K3}}{R_{\Sigma K3}} = \frac{55,33}{81,9} \Rightarrow K_{yK3} = 1,12$$

$$i_{yK2} = \sqrt{2} \cdot K_{yK3} \cdot I_{K3}^{(3)} \quad (88)$$

$$i_{yK2} = \sqrt{2} \cdot 1,12 \cdot 2,22 = 3,52 \text{ кА}$$

### 7.2.2 Двухфазное КЗ

Расчёт в точке К1 произведём по формулам (89)...(91):

$$R_{\Sigma K1} = R_T + R_{AB1} + R_{TA1} \quad (89)$$

$$R_{\Sigma K1} = 16,6 + 2,4 + 3 = 22 \text{ мОм}$$

$$X_{\Sigma K1} = X_T + X_{AB1} + X_{TA1} \quad (90)$$

$$X_{\Sigma K1} = 41,7 + 2 + 4,8 = 48,5 \text{ мОм}$$

$$Z_{\Sigma K1} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{R_{\Sigma K1}^2 + X_{\Sigma K1}^2} \quad (91)$$

$$Z_{\Sigma K1} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{22^2 + 48,5^2} = 61,5 \text{ мОм}$$

Для определения тока двухфазного металлического КЗ используем формулу (92):

$$I_{K1}^{(2)} = \frac{U_{H.HH}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K1}} \quad (92)$$

$$I_{K1}^{(2)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 61,5} = 3,76 \text{ кА}$$

Рассчитаем дуговое двухфазное КЗ по формулам (93)...(94):

$$Z_{\Sigma K1} = 61,5 \text{ мОм} \Rightarrow K_{C1} = 0,82; K_{C2} = 0,74$$

$$I_{KD}^{(2)} = I_{K1}^{(2)} \cdot K_{C1} \quad (93)$$

$$I_{KD}^{(2)} = 3,76 \cdot 0,82 = 3,08 \text{ кА}$$

$$I_{KM}^{(2)} = I_{K1}^{(2)} \cdot K_{C2} \quad (94)$$

$$I_{KM}^{(2)} = 3,76 \cdot 0,74 = 2,78 \text{ кА}$$

Расчёт в точке К2 производим по формулам (95)...(97):

$$R_{\Sigma K2} = R_{\Sigma K1} + R_{KL1} \quad (95)$$

$$R_{\Sigma K2} = 22 + 13,92 = 35,92 \text{ мОм}$$

$$X_{\Sigma K2} = X_{\Sigma K1} + X_{KL1} \quad (96)$$

$$X_{\Sigma K2} = 48,5 + 1,14 = 49,64 \text{ мОм}$$

$$Z_{\Sigma K2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{R_{\Sigma K2}^2 + X_{\Sigma K2}^2} \quad (97)$$

$$Z_{\Sigma K2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{35,92^2 + 49,64^2} = 70,75 \text{ мОм}$$

Ток двухфазного металлического КЗ определим по формуле (98):

$$I_{K2}^{(2)} = \frac{U_{H.HH}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K2}} \quad (98)$$

$$I_{K2}^{(2)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 70,75} = 3,26 \text{ кА}$$

Дуговое двухфазное КЗ определим по формулам (99) и (100):

$$Z_{\Sigma K2} = 70,75 \text{ мОм} \Rightarrow K_{C1} = 0,83; K_{C2} = 0,75$$

$$I_{KD}^{(2)} = I_{K2}^{(2)} \cdot K_{C1} \quad (99)$$

$$I_{KD}^{(2)} = 3,26 \cdot 0,83 = 2,71 \text{ кА}$$

$$I_{KM}^{(2)} = I_{K2}^{(2)} \cdot K_{C2} \quad (100)$$

$$I_{KM}^{(2)} = 3,26 \cdot 0,75 = 2,45 \text{ кА}$$

Расчёт в точке КЗ произведем, применив формулы (101)...(103):

$$R_{\Sigma K3} = R_{\Sigma K2} + R_{AB2} + R_{KL2} \quad (101)$$

$$R_{\Sigma K3} = 35,92 + 5,5 + 40,48 = 81,9 \text{ мОм}$$

$$X_{\Sigma K3} = X_{\Sigma K2} + X_{AB2} + X_{KL2} \quad (102)$$

$$X_{\Sigma K3} = 49,64 + 4,5 + 2,2 = 56,34 \text{ мОм}$$

$$Z_{\Sigma K2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{R_{\Sigma K3}^2 + X_{\Sigma K3}^2} \quad (103)$$

$$Z_{\Sigma K2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{81,9^2 + 56,34^2} = 114,79 \text{ мОм}$$

Ток двухфазного металлического КЗ рассчитаем по формуле (104):

$$I_{K3}^{(2)} = \frac{U_{H.HH}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K3}} \quad (104)$$

$$I_{K3}^{(2)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 114,79} = 2,01 \text{ кА}$$

Дуговое двухфазное КЗ определим по формуле (105) и (106):

$$Z_{\Sigma K3} = 114,79 \text{ мОм} \Rightarrow K_{C1} = 0,87; K_{C2} = 0,8$$

$$I_{\text{КД}}^{(2)} = I_{\text{КЗ}}^{(2)} \cdot K_{\text{C1}} \quad (105)$$

$$I_{\text{КД}}^{(2)} = 2,01 \cdot 0,87 = 1,75 \text{ кА}$$

$$I_{\text{КМ}}^{(2)} = I_{\text{КЗ}}^{(2)} \cdot K_{\text{C2}} \quad (106)$$

$$I_{\text{КМ}}^{(2)} = 2,01 \cdot 0,8 = 1,61 \text{ кА}$$

### 7.2.3 Однофазное КЗ

Найдём значения в точке К1 по формулам (107)...(111):

$$R_{\Sigma\text{К1}} = R_{\text{T}} + R_{\text{AB1}} + R_{\text{ТА1}} \quad (107)$$

$$R_{\Sigma\text{К1}} = 16,6 + 2,4 + 3 = 22 \text{ мОм}$$

$$R_{0\Sigma\text{К1}} = R_{\text{T}_0} + R_{\text{AB1}_0} + R_{\text{ТА1}_0} \quad (108)$$

$$R_{0\Sigma\text{К1}} = 19,3 + 2,4 + 3 = 24,7 \text{ мОм}$$

$$X_{0\Sigma\text{К1}} = X_{\text{T}_0} + X_{\text{AB1}_0} + X_{\text{ТА1}_0} \quad (109)$$

$$X_{0\Sigma\text{К1}} = 43 + 2 + 4,8 = 49,8 \text{ мОм}$$

$$X_{\Sigma\text{К1}} = X_{\text{T}} + X_{\text{AB1}} + X_{\text{ТА1}} \quad (110)$$

$$X_{\Sigma\text{К1}} = 41,7 + 2 + 4,8 = 48,5 \text{ мОм}$$

$$Z_{\Sigma\text{К1}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{(2 \cdot R_{\Sigma\text{К1}} + R_{0\Sigma\text{К1}})^2 + (2 \cdot X_{\Sigma\text{К1}} + X_{0\Sigma\text{К1}})^2} \quad (111)$$

$$Z_{\Sigma\text{К1}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{(2 \cdot 22 + 24,7)^2 + (2 \cdot 48,5 + 49,8)^2} = 86,03 \text{ мОм}$$

Ток однофазного металлического КЗ определим по формуле (112):

$$I_{\text{К1}}^{(1)} = \frac{U_{\text{н.нн}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\text{К1}}} \quad (112)$$

$$I_{\text{К1}}^{(1)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 86,03} = 2,68 \text{ кА}$$

Дуговое однофазное КЗ определим по формулам (113) и (114):



$$Z_{\Sigma K1} = 86,03 \text{ мОм} \Rightarrow K_{C1} = 0,87; K_{C2} = 0,78$$

$$I_{KD}^{(1)} = I_{K1}^{(1)} \cdot K_{C1} \quad (113)$$

$$I_{KD}^{(1)} = 2,68 \cdot 0,87 = 2,33 \text{ кА}$$

$$I_{KM}^{(1)} = I_{K1}^{(1)} \cdot K_{C2} \quad (114)$$

$$I_{KM}^{(1)} = 2,68 \cdot 0,78 = 2,09 \text{ кА}$$

Определим значения в точке К2 по формулам (115)...(119):

$$R_{\Sigma K2} = R_{\Sigma K1} + R_{KL1} \quad (115)$$

$$R_{\Sigma K2} = 22 + 13,92 = 35,32 \text{ мОм}$$

$$R_{0\Sigma K2} = R_{0\Sigma K1} + R_{KL1_0} \quad (116)$$

$$R_{0\Sigma K2} = 24,7 + 2 \cdot 1,16 \cdot 12 = 52,54 \text{ мОм}$$

$$X_{0\Sigma K2} = X_{0\Sigma K1} + X_{KL1_0} \quad (117)$$

$$X_{0\Sigma K2} = 49,8 + 0,4 \cdot 12 = 54,6 \text{ мОм}$$

$$X_{\Sigma K2} = X_{\Sigma K1} + X_{KL1} \quad (118)$$

$$X_{\Sigma K2} = 48,5 + 1,14 = 49,64 \text{ мОм}$$

$$Z_{\Sigma K2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{(2 \cdot R_{\Sigma K2} + R_{0\Sigma K2})^2 + (2 \cdot X_{\Sigma K2} + X_{0\Sigma K2})^2} \quad (119)$$

$$Z_{\Sigma K2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{(2 \cdot 35,32 + 52,54)^2 + (2 \cdot 49,64 + 54,6)^2} = 113,8 \text{ мОм}$$

Для определения тока однофазного металлического КЗ возьмем формулу (120):

$$I_{K2}^{(1)} = \frac{U_{H.HH}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K2}} \quad (120)$$

$$I_{K2}^{(1)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 113,8} = 2,03 \text{ кА}$$

Дуговое однофазное КЗ рассчитаем по формуле (121) и (122):

$$Z_{\Sigma K2} = 113,8 \text{ мОм} \Rightarrow K_{C1} = 0,89; K_{C2} = 0,8$$

$$I_{KD}^{(2)} = I_{K2}^{(2)} \cdot K_{C1} \quad (121)$$

$$I_{KD}^{(2)} = 2,03 \cdot 0,89 = 1,81 \text{ кА}$$

$$I_{KM}^{(2)} = I_{K2}^{(2)} \cdot K_{C2} \quad (122)$$

$$I_{KM}^{(2)} = 2,03 \cdot 0,8 = 1,62 \text{ кА}$$

Расчёт в точке КЗ производим по формулам (123)...(127):

$$R_{\Sigma K3} = R_{\Sigma K2} + R_{AB2} + R_{KL2} \quad (123)$$

$$R_{\Sigma K3} = 35,32 + 5,5 + 40,48 = 81,3 \text{ мОм}$$

$$R_{0\Sigma K3} = R_{0\Sigma K2} + R_{KL2_0} + R_{AB2_0} \quad (124)$$

$$R_{0\Sigma K3} = 52,54 + 2 \cdot 1,84 \cdot 22 + 5,5 = 139 \text{ мОм}$$

$$X_{\Sigma K3} = X_{\Sigma K2} + X_{AB2} + X_{KL2} \quad (125)$$

$$X_{\Sigma K3} = 49,64 + 4,5 + 2,2 = 56,34 \text{ мОм}$$

$$X_{0\Sigma K3} = X_{0\Sigma K2} + X_{KL2_0} + X_{AB2_0} \quad (126)$$

$$X_{0\Sigma K3} = 54,6 + 0,4 \cdot 22 + 4,5 = 67,9 \text{ мОм}$$

$$Z_{\Sigma K3} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{(2 \cdot R_{\Sigma K3} + R_{0\Sigma K3})^2 + (2 \cdot X_{\Sigma K3} + X_{0\Sigma K3})^2} \quad (127)$$

$$Z_{\Sigma K3} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{(2 \cdot 81,3 + 139)^2 + (2 \cdot 56,34 + 67,9)^2} = 202,95 \text{ мОм}$$

Ток однофазного металлического КЗ определим по формуле (128):

$$I_{K3}^{(1)} = \frac{U_{H.HH}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K3}} \quad (128)$$

$$I_{K3}^{(1)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 202,95} = 1,14 \text{ кА}$$

Нахождение дугового однофазного короткого замыкания в точке КЗ формулы (129) и (130):

$$Z_{\Sigma K3} = 202,95 \text{ мОм} \Rightarrow K_{C1} = 0,95; K_{C2} = 0,85$$

$$I_{KD}^{(1)} = I_{K3}^{(1)} \cdot K_{C1} \quad (129)$$

$$I_{KD}^{(1)} = 1,14 \cdot 0,95 = 1,08 \text{ кА}$$

$$I_{KM}^{(1)} = I_{K3}^{(1)} \cdot K_{C2} \quad (130)$$

$$I_{KM}^{(1)} = 1,14 \cdot 0,85 = 0,97 \text{ кА}$$

Сводим полученные данные с расчётов в таблицу 7.

Таблица 7 - Данные расчётов значений коротких замыканий

| Виды<br>КЗ | Трёхфазное       |                     |                     |                  | Двухфазное       |                     |                     | Однофазное       |                     |                     |
|------------|------------------|---------------------|---------------------|------------------|------------------|---------------------|---------------------|------------------|---------------------|---------------------|
|            | $I_{KM}$ ,<br>кА | $I_{KDнач}$ ,<br>кА | $I_{KDуст}$ ,<br>кА | $i_{уд}$ ,<br>кА | $I_{KM}$ ,<br>кА | $I_{KDнач}$ ,<br>кА | $I_{KDуст}$ ,<br>кА | $I_{KM}$ ,<br>кА | $I_{KDнач}$ ,<br>кА | $I_{KDуст}$ ,<br>кА |
| К1         | 3,15             | 3,5                 | 4,32                | 7,7              | 2,78             | 3,08                | 3,76                | 2,09             | 2,33                | 2,68                |
| К2         | 2,82             | 3,08                | 3,76                | 5,74             | 2,45             | 2,71                | 3,26                | 1,62             | 1,81                | 2,03                |
| К3         | 1,73             | 1,93                | 2,22                | 3,52             | 1,61             | 1,75                | 2,01                | 1,14             | 1,08                | 0,97                |

Вывод по разделу 7: произведены расчёты токов коротких замыканий, для дальнейшей проверки выбранного оборудования и проводников.

## 8 Определение параметров молниезащиты производства

«Расчет защиты от прямых ударов молнии заключается в определении зон защиты, типов защиты и параметров» [8].

«Тип молниезащиты - одностержневой. Последующие расчеты производились по методическим указаниям» [10].

«Исходные данные:

– высота молниеотвода ( $h$ ) равна 40 метров

– высота защищаемого сооружения ( $h_x$ ) 12 метров.

По таблице 8 определяем необходимые параметры» [10].

Таблица 8 - Расчёт зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода

| Надежность защиты, $P_z$ | Высота молниеотвода $h$ , м | Высота конуса $h_0$ , м | Радиус конуса $r_0$ , м |
|--------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 0,9                      | от 0 до 100                 | $0,85 \cdot h$          | $1,2 \cdot h$           |

«Расчёт параметров молниезащиты определяется по формулам (131) и (132):

$$h_0 = 0.85 \cdot h \quad (131)$$

$$h_0 = 0,85 \cdot 40 = 34 \text{ м}$$

$$r_0 = 1,2 \cdot h \quad (132)$$

$$r_0 = 1,2 \cdot 40 = 48 \text{ м} \gg [10].$$

«Радиус горизонтального сечения  $r_x$  определяется по формуле (133).

$$r_x = \frac{r_0 \cdot (h_0 - h_x)}{h_0} \quad (133)$$

«По значениям, построена зона защитного одиночного стержневого молниеотвода, представленная на рисунке 4» [10].

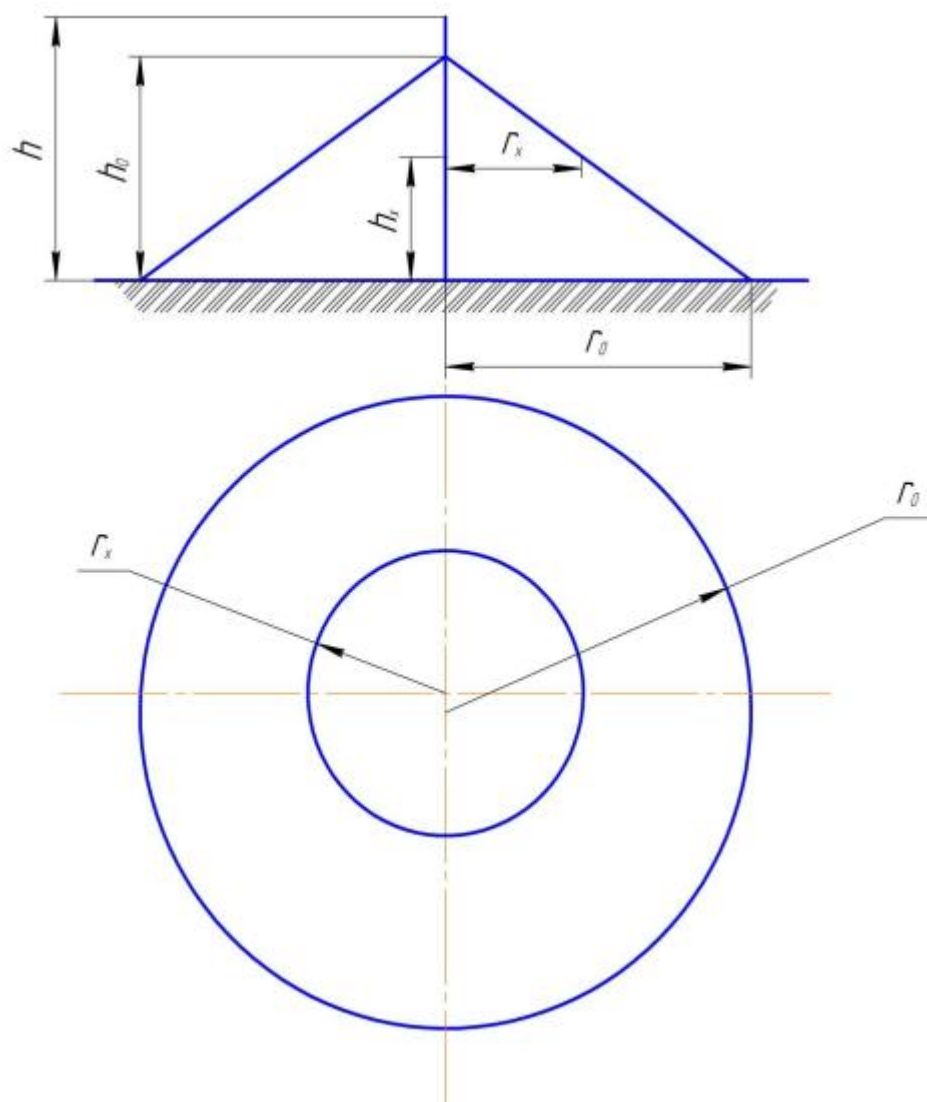


Рисунок 4 - Зона защиты молниеотвода

Вывод по разделу 8: произведен расчёт молниезащиты производства.

## 9 Расчёт параметров заземления производства

«Расчет искусственного группового защитного заземляющего устройства выполнен, исходя из допустимого, согласно ПУЭ, сопротивления заземлителя растеканию тока методом коэффициентов использования.

Вертикальные заземлители выполнены уголком размером 50×50×5 мм, длиной  $l=3$  м.

Предварительное количество стержней 17 шт, расстояние между ними 6 м.

Горизонтальные заземлители исполняются в виде стальных оцинкованных полос 40х5 мм. Грунт – супесок с  $\rho_{гр} = 300 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ » [7].

«Определяем сопротивление стержневого электрода по формуле (134):

$$R_B = \frac{\rho \cdot K_B}{2 \cdot \pi \cdot l_3} \left( \ln \frac{2 \cdot l_3}{d_3} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot h_3 + l_3}{4 \cdot h_3 - l_3} \right) \quad (134)$$
$$R_B = \frac{300 \cdot 1,5}{2 \cdot \pi \cdot 3} \left( \ln \frac{2 \cdot 3}{0,0475} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot 2 + 0,0475}{4 \cdot 2 - 0,0475} \right) = 115,52 \text{ Ом}$$

где  $l_3$  – длина электрода;

$d_3$  – диаметр электрода;

$h_3$  – глубина заложения электрода;

$\rho$  – удельное сопротивление грунта;

$K_B$  – повышающий коэффициент для вертикального электрода» [4].

«Потребное количество электродов найдем по формуле (135):

$$n' = \frac{R_B}{R_3 \cdot n_B} \quad (135)$$
$$n' = \frac{115,52}{12 \cdot 0,6} = 17 \text{ шт}$$

где  $R_3$  – допустимое сопротивление заземляющего устройства с учетом удельного сопротивления грунта;

$n_B$  – коэффициент использования вертикальных заземлителей» [4].

«Определяем длину соединительной полосы по формуле (136):

$$l_n = a \cdot n' \quad (136)$$

$$l_n = 6 \cdot 17 = 102 \text{ м,}$$

где  $a$  – расстояние между электродами» [4].

«Находим сопротивление соединительной полосы по формуле (137):

$$R_\Gamma = \frac{\rho \cdot K_\Gamma}{2 \cdot \pi \cdot l_n} \cdot \ln \left( \frac{2 \cdot l_n^2}{h_n \cdot b} \right), \quad (137)$$

$$R_\Gamma = \frac{300 \cdot 4}{2 \cdot \pi \cdot 102} \cdot \ln \left( \frac{2 \cdot 102^2}{0,5 \cdot 0,05} \right) = 25,52 \text{ Ом,}$$

где  $K_\Gamma$  – повышающий коэффициент для горизонтальных электродов;

$b$  – ширина горизонтального электрода;

$h_n$  – глубина заложения горизонтального заземлителя» [4].

«Действительное сопротивление растекания тока горизонтального заземлителя с учетом коэффициента использования  $n_\Gamma$  определяем по формуле (138):

$$R'_\Gamma = \frac{R_\Gamma}{n_\Gamma} \quad (138)$$

$$R'_\Gamma = \frac{25,52}{0,32} = 79,75 \text{ Ом} \gg [4].$$

«Сопротивление растеканию тока вертикальных заземлителей с учетом сопротивления горизонтального заземлителя (без учета естественных заземлителей) определяем по формуле (139):

$$R'_B = \frac{R'_B \cdot R_3}{R'_B - R_3} \quad (139)$$

$$R'_B = \frac{79,75 \cdot 12}{79,75 - 12} = 14,12 \text{ Ом} \gg [4].$$

«Уточненное количество вертикальных заземлителей определяем по формуле (140):

$$n'_B = \frac{R_B}{n_B \cdot R_B} \quad (140)$$

$$n'_B = \frac{115,52}{0,6 \cdot 14,12} = 13,6 \approx 14 \text{ шт}$$

Для заземления электрооборудования было принято решение использовать в качестве заземлителя стальную оцинкованную полосу 40x5, прикрепленную к стене на высоте 0,4 м» [4].

Вывод по разделу 9: рассчитаны параметры заземлителей на производстве. Определено количество и тип используемых в качестве проводников заземления элементов.

Рассчитанные параметры заземления отображены на схеме заземляющего устройства в формате А1.



## 10 Проверочный расчёт выбранного электрооборудования

После расчётов токов коротких замыканий требуется провести проверку рациональности использования электрооборудования и проводников.

### 10.1 Проверка автоматических выключателей

В качестве примера произведём проверку выбранного автоматического выключателя типа ВА-СЭЩ-TS100 [14] с номинальным током расцепителя 63 А.

Данные для проверки автоматического выключателя сведены в таблицу 9.

Таблица 9 - Параметры автоматического выключателя типа ВА-СЭЩ-TS100

| Тип          | Номинальный ток выключателя, А | Номинальный ток расцепителя, А | Предельная коммутационная способность аппарата, кА | Ток динамической устойчивости аппарата, кА |
|--------------|--------------------------------|--------------------------------|--|--|
| ВА-СЭЩ-TS100 | 63                             | 63                             | 47,5   | 52,5                                       |

«Проверка автоматического выключателя будет производиться по следующим условиям:

Чувствительность к двухфазному току КЗ находим, применив формулу (141):

$$K_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{n0min}^{(2)}}{I_{\text{ап.з}}} \geq 1,4 - 1,5 \quad (141)$$
$$K_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{3,08 \cdot 10^3}{63} = 48,8 \geq 1,4 - 1,5$$

Чувствительность к однофазному току КЗ определяем по формуле (142):

$$K_{\text{ч}}^{(1)} = \frac{I_{\text{номин}}^{(1)}}{I_{\text{ап.з}}} \geq 1,4 - 1,5 \quad (142)$$

$$K_{\text{ч}}^{(1)} = \frac{2,33 \cdot 10^3}{63} = 36,98 \geq 1,4 - 1,5$$

Отключающая способность рассчитывается по формуле (143):

$$I_{\text{ПКС}} \geq I_{\text{п0max}}^{(3)} \quad (143)$$

$$47,5 \geq 3,15$$

Динамическая устойчивость находится формулой (144):

$$i_{\text{дин}} \geq i_{\text{уд.мах}} \quad (144)$$

$$52,5 \geq 7,7$$

Проверка показала, что оборудование подходит для защиты выбранной линии» [10].

## 10.2 Проверка кабельных линий на потерю напряжения

«Выбраны кабели марки ВБбШнг(А).

Необходимо проверить кабели на потерю напряжения по цепи.

Проверка будет выполняться по формуле (145):

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot I_p \cdot L}{U_n} \cdot (r_0 \cdot \cos \varphi + x_0 \cdot \sin \varphi) \cdot 100 \text{» [10].} \quad (145)$$

В качестве примера рассчитаем кабельную линию от КТП до ШР1:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot 65,77 \cdot 0,011}{380} \cdot (1,16 \cdot 0,75 + 0,0675 \cdot 0,66) \cdot 100 = 0,3 \%$$

Вывод по разделу 10: произведена проверка автоматических выключателей по чувствительности к различным видам токов короткого замыкания. Проверка показала, что выбранные аппараты защиты обосновано использовать на рассматриваемых участках. Для остальных участков произведена аналогичная проверка.

Для выбранных кабелей на каждом участке производства проведена проверка на потерю напряжения с учетом длины. Данные по всем линиям и результатам расчётов, сведены в таблицу 10.

Падения напряжения ни на одном из кабелей не превысило 2%. Максимальное значение потери напряжения на одном из участков является 1,58% (Насос нейтрализатора). По правилам устройства электроустановок (ПУЭ) [7] допускается падение до 5%.

Все кабели на рассматриваемых участках проходят по условиям потери напряжения.

Таблица 10 - Определение потери напряжения в кабельных линиях

| Наименование линии                    | cosφ | sinφ | I <sub>p</sub> , А | Марка кабелей   | U <sub>л</sub> , В | r <sub>0</sub> , Ом/км | x <sub>0</sub> , Ом/км | L, км | ΔU, % |
|---------------------------------------|------|------|--------------------|-----------------|--------------------|------------------------|------------------------|-------|-------|
| От КТП до ШР1                         | 0,75 | 0,66 | 65,77              | ВБбШнг(А) 5х16  | 380                | 1,16                   | 0,0675                 | 0,011 | 0,30  |
| От КТП до ШР2                         | 0,75 | 0,66 | 74,78              | ВБбШнг(А) 5х25  |                    | 0,74                   | 0,0662                 | 0,021 | 0,43  |
| От КТП до ШР3                         | 0,79 | 0,61 | 65,55              | ВБбШнг(А) 5х16  |                    | 1,16                   | 0,0675                 | 0,032 | 0,91  |
| От КТП до ШР4                         | 0,79 | 0,61 | 69,21              | ВБбШнг(А) 5х16  |                    | 1,16                   | 0,0675                 | 0,023 | 0,69  |
| От КТП до ШР5                         | 0,79 | 0,61 | 46,01              | ВБбШнг(А) 5х10  |                    | 1,84                   | 0,073                  | 0,002 | 0,06  |
| Резервуар перемешивания               | 0,75 | 0,66 | 28,11              | ВБбШнг(А) 5х10  |                    | 1,84                   | 0,073                  | 0,021 | 0,38  |
| Конвейер ленточный                    | 0,75 | 0,66 | 22,79              | ВБбШнг(А) 5х4   |                    | 4,63                   | 0,095                  | 0,017 | 0,62  |
| Дозатор наполнителя                   | 0,75 | 0,66 | 6,08               | ВБбШнг(А) 5х1,5 |                    | 12,3                   | 0,126                  | 0,012 | 0,31  |
| Кран мостовой                         | 0,5  | 0,87 | 6,08               | ВБбШнг(А) 5х1,5 |                    | 12,3                   | 0,126                  | 0,054 | 0,94  |
| Шкаф управления                       | 0,6  | 0,8  | 1,52               | ВБбШнг(А) 5х1,5 |                    | 12,3                   | 0,126                  | 0,017 | 0,09  |
| Насос нейтрализатора                  | 0,8  | 0,6  | 16,71              | ВБбШнг(А) 5х2,5 |                    | 12,3                   | 0,126                  | 0,021 | 1,58  |
| Насос резервуара перемешивания        | 0,8  | 0,6  | 24,31              | ВБбШнг(А) 5х4   |                    | 4,63                   | 0,095                  | 0,009 | 0,37  |
| Насос технологического конденсата     | 0,8  | 0,6  | 8,36               | ВБбШнг(А) 5х1,5 |                    | 12,3                   | 0,126                  | 0,014 | 0,53  |
| Насос технологического пара           | 0,8  | 0,6  | 1,14               | ВБбШнг(А) 5х1,5 |                    | 12,3                   | 0,126                  | 0,024 | 0,12  |
| Насос упариваемого раствора 1 ступени | 0,8  | 0,6  | 1,14               | ВБбШнг(А) 5х1,5 |                    | 12,3                   | 0,126                  | 0,009 | 0,05  |
| Насос упариваемого раствора 2 ступени | 0,8  | 0,6  | 1,14               | ВБбШнг(А) 5х1,5 |                    | 12,3                   | 0,126                  | 0,011 | 0,06  |
| Насос упариваемого раствора 3 ступени | 0,8  | 0,6  | 1,14               | ВБбШнг(А) 5х1,5 |                    | 12,3                   | 0,126                  | 0,013 | 0,07  |
| Насос упариваемого раствора 4 ступени | 0,8  | 0,6  | 1,14               | ВБбШнг(А) 5х1,5 |                    | 12,3                   | 0,126                  | 0,015 | 0,08  |
| Система осушки воздуха                | 0,8  | 0,6  | 7,6                | ВБбШнг(А) 5х1,5 |                    | 12,3                   | 0,126                  | 0,008 | 0,27  |
| Компрессор воздушный винтовой         | 0,8  | 0,6  | 8,36               | ВБбШнг(А) 5х1,5 |                    | 12,3                   | 0,126                  | 0,008 | 0,30  |

## Заключение

В начале выполнения выпускной квалификационной работы, была поставлена цель выполнить проект по реконструкции системы электроснабжения производства сульфат-нитрат аммония. Для достижения цели были выполнены поставленные задачи.

Осуществлён расчёт ожидаемых нагрузок. Для этого предварительно изучены исходные данные производства, составлен перечень электрооборудования, которое участвует в производственном процессе. Произведен расчёт ожидаемых нагрузок по методу коэффициента спроса. Результаты расчётов сведены в таблицу 3. Произведен расчёт мощности и определено число и тип трансформаторов. В рамках данного расчёта к установке было намечено два варианта: трансформаторы марки ТМГ-250/6 и трансформаторы марки ТМГ 160/6. Проведя экономический расчёт затрат было определено, что более выгодно установить трансформаторы типа ТМГ-160/6. Выбрана схема электроснабжения производства. Система 380/220 В выбрана с глухозаземленной нейтралью трансформатора с пятипроводной электрической сетью. Подобрано КТП производства «Электроцит» г. Чехов.

Произведен подбор проводников, трансформаторов тока и автоматических выключателей. Проведены расчёты токов короткого замыкания, после чего произведена проверка выбранных позиций по чувствительности к токам КЗ, отключающей способности, динамической устойчивости. Кабельные линии проверены на потерю напряжению по всей используемой длине. Падения напряжения ни на одном из кабелей не превысило 2%. По ПУЭ допускается падение до 5%.

Произведен расчёт заземления производства. В качестве проводников для заземления выбраны 14 вертикальных заземлителей в исполнении 50х50х5 мм и стальная полоса 40х5 в качестве горизонтальных заземлителей.

Подобрана и рассчитана молниезащита здания. В частности, тип молниезащиты одностержневой, высота молниеотвода 40 метров.

## Список используемых источников

1. Вахнина В.В., Черненко А.Н. Проектирование систем электроснабжения: электронное учеб.-метод. пособие. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2016. 78 с. URL: [https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/2976/1/Vahnina%20Chernenko\\_EUMI\\_Z.pdf](https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/2976/1/Vahnina%20Chernenko_EUMI_Z.pdf) (дата обращения: 10.10.2022).
2. Вахнина В.В., Самолина О.В., Черненко А.Н. Электроэнергетика и электротехника. Выполнение бакалаврской работы: электронное учеб.-метод. пособие. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2020. 1 оптический диск. URL: <http://hdl.handle.net/123456789/18603> (Дата обращения 10.09.2022).
3. ГОСТ Р 55710-2013 Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений. [Электронный ресурс]. -URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200105707> (Дата обращения: 10.10.2022)
4. ГОСТ Р 58882-2020 Заземляющие устройства. Системы уравнивания потенциалов. Заземлители. [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200173634> (Дата обращения: 10.10.2022).
5. ГОСТ Р 50571. Электроустановки зданий. [Электронный ресурс]: URL: <http://www.sonel.ru/ru/biblio/standards/gost-50571/> (дата обращения: 10.10.2022).
6. ГОСТ Р 52735-2007 Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ [Электронный ресурс]. -URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200052838> (Дата обращения: 10.10.2022).
7. ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ [Электронный ресурс]: URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-28249-93> (дата обращения: 10.10.2022).
8. Единая система конструкторской документации. [Электронный ресурс]: URL: <http://www.robot.bmstu.ru/files/GOST/gost-eskd.html> (дата обращения: 10.10.2022).

9. Мельников М.А. Внутрицеховое электроснабжение. [Электронный ресурс]. -URL: [https://portal.tpu.ru/SHARED/k/KLADIEV/uch\\_deyat/Tab1/MelnikovVnutrtsehelsnab2007.pdf](https://portal.tpu.ru/SHARED/k/KLADIEV/uch_deyat/Tab1/MelnikovVnutrtsehelsnab2007.pdf) (Дата обращения: 10.10.2022).
10. Общая номенклатура изделий. ОАО «Электрощит» г. Чехов. 2019 г. [Электронный ресурс]: URL: <https://www.electroshield.ru/>(дата обращения: 10.10.2022).
11. Правила устройства электроустановок. - 7-е изд. - М.: Изд-во НИЦ ЭНАС.
12. РД 34.21.122-87 Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. [Электронный ресурс]: URL: <http://www.sonel.ru/ru/biblio/standards/gost-50571/> (дата обращения: 10.10.2022).
13. СНиП 23-05-95 Естественное и искусственное освещение (с Изменением N 1) [Электронный ресурс]: URL: <http://www.sonel.ru/ru/biblio/standards/gost-50571/> (дата обращения: 10.10.2022).
14. Расчет и проектирование систем электроснабжения: справочные материалы по электрооборудованию [Электронный ресурс]. -URL: <https://www.c-o-k.ru/images/library/cok/355/35545.pdf> (Дата обращения: 10.10.2022)
15. Электрощит Самара [Электронный ресурс]: URL: <http://tolyatti.transformator.me/upload/iblock/13f/13fa46e015aadeb3c17ff4529c0777b1.pdf> (дата обращения: 10.10.2022).
16. Best Practice Manual For Transformers. [Электронный ресурс]: URL: <https://electrical-engineering-portal.com/res/Best-Practice%20Manual-Transformers.pdf> (дата обращения: 10.10.2022).
17. Guide to Forms of Separation – Low Voltage Switchgear and Controlgear Assemblies to BS EN 61439-2 [Электронный ресурс]: URL:

<https://electrical-engineering-portal.com/res/Guide-to-forms-of-separation-final.pdf> (дата обращения: 10.10.2022).

18. Medium Voltage Switching Devices Selection for application and purpose [Электронный ресурс]: URL: <https://electrical-engineering-portal.com/res/MV-Switching-devices-selection-for-application.pdf> (дата обращения: 10.10.2022).

19. Protection of Electrical Networks. [Электронный ресурс]: URL: <https://electrical-engineering-portal.com/res/Protection-of-Electrical-Networks.pdf> (дата обращения: 10.10.2022).

20. Power transformer maintenance and acceptance testing [Электронный ресурс]: URL: <https://electrical-engineering-portal.com/res/Power-Transformer-Maintenance-And-Acceptance-Testing.pdf> (дата обращения: 10.10.2022).