

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

Институт энергетики и электротехники  
(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»  
(наименование кафедры)

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электроснабжение  
(направленность (профиль)/специализация)

## БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему «Проектирование системы электроснабжения предприятия по  
производству кузовных изделий»

Студент

Н.И. Королев

(И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_  
(личная подпись)

Руководитель

С.В. Шаповалов

(И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_  
(личная подпись)

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_  
(личная подпись)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Тольятти 2018

## **Аннотация**

В настоящей бакалаврской работе для предприятия по производству кузовных изделий определены следующие параметры электроснабжения предприятия:

- произведен расчет полной нагрузки предприятия и напряжения внешнего электроснабжения;
- в соответствии с расчетными параметрами выбраны трансформаторы главной понизительной подстанции и определено количество, мощности и типы трансформаторов подстанций подразделений предприятия;
- произведен выбор электрооборудования;
- определены токи короткого замыкания, спроектирована релейная защита трансформаторов.

Состав бакалаврской работы:

- пояснительная записка на 60 листах;
- графическая часть - 6 листов формата А1.

## Содержание

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                                                                                                | 4  |
| 1 Определение ожидаемых электрических нагрузок промпредприятия.....                                                          | 5  |
| 1.1 Расчет нагрузок .....                                                                                                    | 5  |
| 1.2 Расчет осветительной нагрузки по подразделениям промпредприятия .....                                                    | 8  |
| 1.3 Построение картограммы электрических нагрузок предприятия .....                                                          | 9  |
| 2. Определение количества, мощности и типа трансформаторов подстанций предприятия .....                                      | 12 |
| 3 Определение данных для выбора схемы внешнего электроснабжения и трансформаторов ГПП предприятия.....                       | 14 |
| 4 Определение параметров реактивной мощности в СЭС промпредприятия....                                                       | 25 |
| 4.1 Расчет и выбор КУ для ТП группы подразделений предприятия .....                                                          | 25 |
| 4.2 Расчет рабочих токов в СЭС с учетом применения КУ РМ.....                                                                | 32 |
| 5 Выбор марок и сечений кабелей.....                                                                                         | 34 |
| 5.1 Расчет параметров кабельных линий по длительно допустимому току и экономической плотности тока, выбор марок кабелей..... | 34 |
| 6 Расчётные параметры токов короткого замыкания в СЭС .....                                                                  | 37 |
| 7 Оборудование для ГПП .....                                                                                                 | 40 |
| 7.1 Оборудование на 35 кВ: Проверочные расчеты и выбор .....                                                                 | 40 |
| 7.2 Оборудование на 10 кВ: Проверочные расчеты и выбор .....                                                                 | 44 |
| 8 Определение расчетных параметров для защиты силовых трансформаторов                                                        | 49 |
| 8.1 Расчетные параметры токов короткого замыкания (ТКЗ) для трансформаторов .....                                            | 49 |
| Определяем сопротивление системы исходя из мощности короткого замыкания на шинах ГПП:.....                                   | 49 |
| 8.2 Расчетные параметры для дифференциальной токовой защиты.....                                                             | 52 |
| 8.3 Определение параметров максимальной токовой защиты (МТЗ).....                                                            | 54 |
| Заключение .....                                                                                                             | 58 |
| Список используемых источников.....                                                                                          | 59 |

## Введение

Проектируемая система электроснабжения промпредприятия должна иметь высокую надежность и экономичность, так как перебои электроснабжения приводят к увеличению себестоимости товарной продукции из-за снижения объема производства, возникновения брака продукции, увеличения затрат на ремонт и техническое обслуживание производственного электрооборудования. Особо высокие требования к надежности системы электроснабжения предъявляются при наличии технологических процессов непрерывного цикла производства.

Целью работы является разработка системы надежного и бесперебойного электроснабжения предприятия по производству кузовных изделий.

В ходе разработки системы должно быть проведено технико-экономическое обоснование принятых решений в части схем электроснабжения всего предприятия и его отдельных подразделений, определения параметров и типов трансформаторов для ГПП и ТП подразделений предприятия, принимаемым значениям эксплуатационных расходов, допустимых значений потерь электроэнергии и выбора рационального напряжения в схеме.

Достижение цели работы разбито на следующие этапы:

1. Расчет ожидаемых электрических нагрузок предприятия;
2. Определение места расположения ГПП и цеховых ТП;
3. Определение потребного количества и мощностей трансформаторов подстанций подразделений и главной понизительной подстанции с учетом компенсации реактивной мощности;
4. Обоснование выбора схемы внутреннего электроснабжения, марок и сечений кабелей/проводов схемы;
5. Расчет тока при коротком замыкании на внешней и на внутренней системе электроснабжения;
6. Определение параметров и подбор электрооборудования;
7. Расчет параметров релейной защиты и автоматики.

# 1 Определение ожидаемых электрических нагрузок промпредприятия

## 1.1 Расчет нагрузок

Расчетные нагрузки ступеней системы электроснабжения промпредприятия определяем методом упорядоченных диаграмм.

По силовым трехфазным электроприёмникам рассчитаем:

а) активную нагрузку из формулы

$$P_P = K_M \cdot P_C = K_M \cdot K_H \cdot P_H ,$$

где  $K_M$  – коэффициент максимальной активной нагрузки за 30 минутный интервал усреднения;

$K_H$  – коэффициент использования электроприёмников;

$P_C$  – усредненная активная нагрузка для электроприёмников за наиболее загруженную смену;

$P_H$  – номинальная активная мощность электроприёмников.» [1]

б) для  $n_9 \leq 10$  реактивную нагрузку рассчитываем по формуле:

$$Q_P = 1,1 \cdot Q_C = 1,1 \cdot P_H \cdot K_H \cdot \operatorname{tg} \varphi ;$$

для  $n_9 > 10$  реактивную нагрузку рассчитываем по формуле:

$$Q_P = Q_C = P_H \cdot K_H \cdot \operatorname{tg} \varphi ,$$

«где  $\operatorname{tg} \varphi$  – коэффициент РМ электроприёмников;  $Q_C$  – усреднённая реактивная нагрузка.» [2]

в) полную нагрузку рассчитаем по формуле:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} .$$

Все расчетные значения нагрузок по подразделениям с учетом осветительной нагрузки указаны в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Распределение электрических нагрузок по подразделениям предприятия (расчётные данные)

| №<br>п.<br>п.          | Подразделения<br>предприятия      | $P_n$ ,<br>кВт | $P_{n.э}$ ,<br>кВт | $n_p$ | $K_{II}$ | $\cos \varphi$ | $\operatorname{tg} \varphi$ | $P_c$ ,<br>кВт | $Q_c$ ,<br>квар | $K_M$ | $P_p$ ,<br>кВт | $P_{p.o}$ ,<br>кВт | $Q_p$ ,<br>квар | $S_p$ ,<br>кВ*А |
|------------------------|-----------------------------------|----------------|--------------------|-------|----------|----------------|-----------------------------|----------------|-----------------|-------|----------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| <b>Нагрузка 0,4 кВ</b> |                                   |                |                    |       |          |                |                             |                |                 |       |                |                    |                 |                 |
| 1                      | Прессовый цех                     | 9660           | 214,67             | 45    | 0,20     | 0,70           | 1,02                        | 1932           | 1971,03         | 1,15  | 2221,8         | 62,6               | 1971,03         | 3017,19         |
| 2                      | Кузнечный цех                     | 5390           | 48,13              | 112   | 0,25     | 0,75           | 0,88                        | 1347,5         | 1188,38         | 1,10  | 1482,25        | 62,6               | 1188,38         | 1949,06         |
| 3                      | Ремонтно-механический цех         | 514            | 11,42              | 45    | 0,15     | 0,70           | 1,02                        | 77,10          | 78,66           | 1,33  | 102,54         | 7,3                | 78,66           | 135,10          |
| 4                      | Цех товаров народного потребления | 1140           | 57,00              | 20    | 0,30     | 0,70           | 1,02                        | 342            | 348,91          | 1,38  | 471,96         | 27,1               | 348,91          | 608,93          |
| 5                      | Дерево-обделочный цех             | 169            | 24,14              | 7     | 0,25     | 0,60           | 1,33                        | 42,25          | 56,33           | 1,80  | 76,05          | 5,7                | 61,97           | 102,58          |
| 6                      | Цех окраски                       | 1160           | 82,86              | 14    | 0,40     | 0,60           | 1,33                        | 464            | 618,67          | 1,36  | 631,04         | 36,6               | 618,67          | 910,22          |
| 7                      | Транспортный цех                  | 195            | 9,75               | 20    | 0,50     | 0,75           | 0,88                        | 97,5           | 85,99           | 1,10  | 107,25         | 14,8               | 94,59           | 154,41          |
| 8                      | Зарядная станция                  | 45             | 9,00               | 5     | 0,70     | 0,70           | 1,02                        | 31,50          | 32,14           | 1,20  | 37             | 6,7                | 32,14           | 54,89           |
| 9                      | Блок складов                      | 105            | 26,25              | 4     | 0,25     | 0,80           | 0,75                        | 26,25          | 19,69           | 2,35  | 61,69          | 10,4               | 21,66           | 75,27           |
| 10                     | Компрессорная                     | 1250           | 178,57             | 7     | 0,80     | 0,85           | 0,62                        | 1000           | 619,74          | 1,07  | 1070           | 20,1               | 681,72          | 1285,71         |
| 11                     | Лабораторный блок                 | 22             | 5,50               | 4     | 0,50     | 0,70           | 1,02                        | 11             | 11,22           | 1,65  | 18,15          | 10,2               | 11,22           | 30,49           |
| 12                     | Административный корпус           | 30             |                    | -     | 0,30     | 0,70           | 1,02                        | 9              | 9,18            | 1,00  | 9              | 15,2               | 9,18            | 25,88           |
|                        | <b>Предприятие, ВСЕГО:</b>        | 19680          | 5,5...21<br>4      | 283   | 0,38     | 0,71           | 0,99                        | 5380,1         | 5039,94         | 1,37  | 6289,53        | 279,30             | 5118,12         | 8349,74         |

## 1.2 Расчет осветительной нагрузки по подразделениям промпредприятия

В соответствии с нормами проектирования искусственного освещения расчетную осветительную нагрузку электроприемников определяем «по формуле

$$P_{осв} = K_C \cdot P_{yo} \cdot F_n ,$$

где  $K_C$  – коэффициент спроса по активной мощности осветительной нагрузки;

$P_{yo}$  – удельная осветительная нагрузка на  $1\text{ м}^2$  производственной поверхности пола;

$F_n$  – площадь поверхности пола.» [3]

Таблица 1.2 - Осветительные нагрузки производственных подразделений предприятия

| №<br>п/п | Наименование<br>подразделения     | Длина<br>А, м | Ширина<br>В, м | Площадь<br>S, м <sup>2</sup> | Высота<br>Н, м | P <sub>yo</sub> ,<br>Вт/м <sup>2</sup> | P <sub>осв</sub> ,<br>кВт |
|----------|-----------------------------------|---------------|----------------|------------------------------|----------------|----------------------------------------|---------------------------|
| 1        | Прессовый цех                     | 71            | 180            | 12780                        | 16             | 4,9                                    | 62,6                      |
| 2        | Кузнечный цех                     | 71            | 180            | 12780                        | 16             | 4,9                                    | 62,6                      |
| 3        | Ремонтно-механический цех         | 53            | 35             | 1860                         | 16             | 7,3                                    | 13,6                      |
| 4        | Цех товаров народного потребления | 152           | 35             | 5320                         | 12             | 5,1                                    | 27,1                      |
| 5        | Деревообделочный цех              | 82            | 67             | 5490                         | 14             | 5,7                                    | 31,3                      |
| 6        | Цех окраски                       | 131           | 57             | 7470                         | 16             | 4,9                                    | 36,6                      |
| 7        | Транспортный цех                  | 74            | 35             | 2590                         | 16             | 5,7                                    | 14,8                      |
| 8        | Зарядная станция                  | 28            | 39             | 1090                         | 10             | 6,1                                    | 6,7                       |
| 9        | Блок складов                      | 32            | 53             | 1700                         | 10             | 6,1                                    | 10,4                      |
| 10       | Компрессорная                     | 46            | 78             | 3560                         | 14             | 5,7                                    | 20,1                      |
| 11       | Лабораторный блок                 | 43            | 39             | 1680                         | 10             | 6,1                                    | 10,2                      |
| 12       | Административный корпус           | 95            | 28             | 2660                         | 14             | 5,7                                    | 15,2                      |

### 1.3 Построение картограммы электрических нагрузок предприятия

Для достижения наилучших технико-экономических показателей распределительной сети по расходу кабельной продукции, затратам на её прокладку и оптимизации эксплуатационных потерь главная понизительная подстанция (ГПП) располагается максимально близко к центру электрических нагрузок (ЦЭН) всего предприятия, а потребительские трансформаторные подстанции (ТП) – к ЦЭН подразделений/групп подразделений, обслуживаемых этой ТП. Картограмма нагрузок выполняется в виде размещенных на генплане окружностей, для которых:

- центр окружности совпадает с центром тяжести фигуры подразделения предприятия на генплане, т.к. нагрузка принимается равномерно распределенной по площади подразделения предприятия;
- площадь образуемого окружностью круга в принятом масштабе равна расчетной нагрузке подразделения, т.е:

$$P = \pi \cdot R^2 \cdot m ,$$

Масштаб для картограммы  $m$  рассчитываем по подразделению с наименьшей мощностью (лабораторный блок,  $P_{н.м.} = 22$  кВт), радиус окружности на картограмме для этого объекта принимаем равным 0,005 км:

$$m = \frac{P_{н.м.}}{\pi \cdot R^2} = \frac{22}{3,14 \cdot 0,005^2} = 280255 \text{ кВт/км}^2,$$

«Радиус окружности  $R_i$  активных нагрузок  $i$ -го подразделения будет:

$$R_i = \sqrt{\frac{P_i}{\pi \cdot m}} , \text{ км},$$

где  $P_i$  - расчётная нагрузка  $i$ -го подразделения;  $m$  – рассчитанный выше единый масштаб для картограммы,» 280255 кВт/км<sup>2</sup>. [4]

Таблица 1.3 – Координаты центров и расчётные радиусы окружностей картограммы нагрузок по подразделениям предприятия:

| №<br>п/п | Наименование<br>подразделения     | $P_i$<br>кВт | $X_i$<br>км | $Y_i$<br>км | $R_i$<br>км |
|----------|-----------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| 1        | Прессовый цех                     | 9660         | 0,249       | 0,294       | 0,105       |
| 2        | Кузнечный цех                     | 5390         | 0,249       | 0,225       | 0,078       |
| 3        | Ремонтно-механический цех         | 514          | 0,267       | 0,152       | 0,024       |
| 4        | Цех товаров народного потребления | 1140         | 0,030       | 0,075       | 0,036       |
| 5        | Деревообделочный цех              | 169          | 0,171       | 0,110       | 0,014       |
| 6        | Цех окраски                       | 1160         | 0,063       | 0,270       | 0,036       |
| 7        | Транспортный цех                  | 195          | 0,037       | 0,342       | 0,015       |
| 8        | Зарядная станция                  | 45           | 0,068       | 0,327       | 0,007       |
| 9        | Блок складов                      | 105          | 0,045       | 0,426       | 0,011       |
| 10       | Компрессорная                     | 1250         | 0,117       | 0,462       | 0,038       |
| 11       | Лабораторный блок                 | 22           | 0,030       | 0,195       | 0,005       |
| 12       | Административный корпус           | 30           | 0,210       | 0,393       | 0,006       |

Координаты ( $X_0$ ,  $Y_0$ ) центра электрических нагрузок (ЦЭН) предприятия находятся по формулам:

$$X_0 = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot X_i}{\sum_{i=1}^n P_i}; \quad Y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^n P_i},$$

$$X_0 = \frac{9660 \cdot 0.249 + 5390 \cdot 0.249 + 514 \cdot 0.267 + 1140 \cdot 0.030 + 169 \cdot 0.171 + 1160 \cdot 0.063 + 195 \cdot 0.037 + 45 \cdot 0.068 + 105 \cdot 0.045 + 1250 \cdot 0.117 + 22 \cdot 0.030 + 30 \cdot 0.210}{9660 + 5390 + 514 + 1140 + 169 + 1160 + 195 + 45 + 105 + 1250 + 22 + 30} = 0.213 \text{ км};$$

$$Y_0 = \frac{9660 \cdot 0.294 + 5390 \cdot 0.225 + 514 \cdot 0.152 + 1140 \cdot 0.075 + 169 \cdot 0.110 + 1160 \cdot 0.270 + 195 \cdot 0.342 + 45 \cdot 0.327 + 105 \cdot 0.426 + 1250 \cdot 0.462 + 22 \cdot 0.195 + 30 \cdot 0.393}{9660 + 5390 + 514 + 1140 + 169 + 1160 + 195 + 45 + 105 + 1250 + 22 + 30} = 0.268 \text{ км.}$$

Построенная по результатам расчетов картограмма электрических нагрузок подразделений предприятия приведена на рисунке 1.1. На рисунке видно, что ЦЭН находится на территории здания прессового цеха, поэтому ГПП необходимо сместить на свободную площадку.

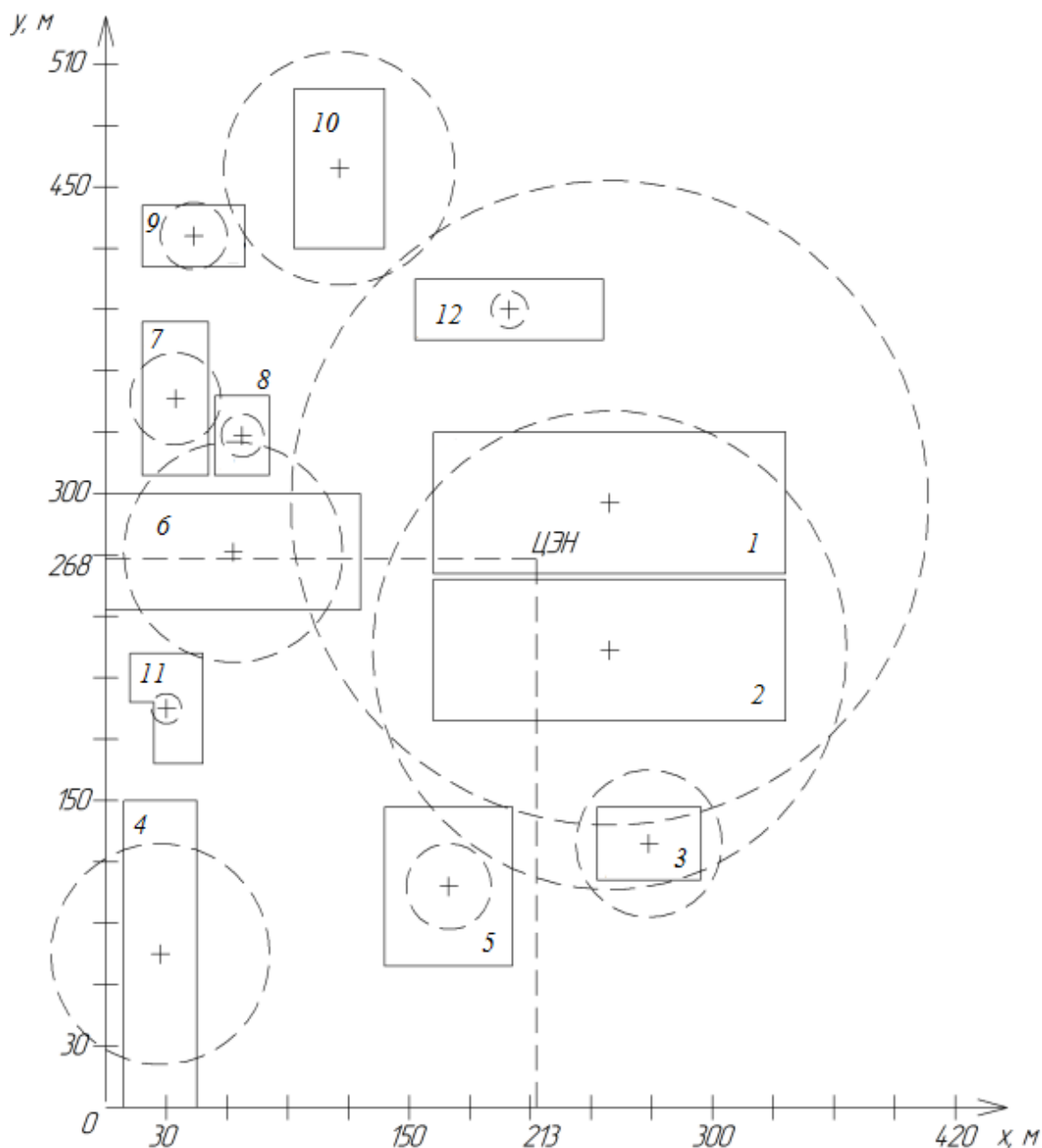


Рисунок 1.1 – Распределение электрических нагрузок по территории предприятия

## **2 Определение количества, мощности и типа трансформаторов подстанций предприятия**

Ввиду частого изменения тарифов на электроэнергию и стоимости строительных работ выбор достаточно экономически обоснованной мощности трансформаторов ТП в сетях промпредприятий можно выполнить по следующим критериям:

- единичную мощность трансформаторов определить в соответствии с рекомендациями из удельной плотности расчетной нагрузки и полной расчетной нагрузки подразделений, подключаемых к ним;
- количество трансформаторов подстанции (и их номинальную мощность) выбрать с учетом указаний по компенсации реактивной мощности и категории электроприемников по степени надежности.
- при выборе мощности трансформаторов необходимо учесть рекомендуемые коэффициенты загрузки и допустимой аварийной перегрузке.

Из соображений экономии подстанции желательно располагать внутри производственных помещений с максимальным приближением к центрам электрических нагрузок и с учетом отсутствия помех технологическому процессу производства.

Корпуса предприятия с малой нагрузкой целесообразно группировать и запитывать от ближайшей ТП с большей нагрузкой. Все расчеты при этом выполнены для суммарных показателей группы, а ЦЭН группы определен аналогично расчету ЦЭН для всего предприятия.

Результаты по подбору трансформаторов подстанций для принятых групп потребителей предприятия представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Количество, мощность и тип трансформаторов ТП

| Наименование<br>подразделений<br>предприятия | Полная<br>нагрузка<br><br>Sp<br>кВА | Уд.плот-<br>ность<br>нагрузки<br><br>σ,<br>кВА/ м <sup>2</sup> | Кате-<br>гория<br>надеж-<br>ности | Принято для<br>трансформаторов |                      |                              |                       |
|----------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------|
|                                              |                                     |                                                                |                                   | Тип                            | Мощ-<br>ность,<br>ВА | Число<br>тр-<br>ров<br>на ТП | Коли-<br>чество<br>ТП |
| Компрессорная                                | 1285,71                             | 0,5                                                            | 1                                 |                                |                      |                              |                       |
| Блок складов                                 | 75,27                               | 0,06                                                           | 3                                 | ТМЗ                            | 1000                 | 2                            | 1                     |
| Административный корпус                      | 25,88                               | 0,005                                                          | 2                                 |                                |                      |                              |                       |
| Транспортный цех                             | 154,41                              | 0,07                                                           | 2                                 |                                |                      |                              |                       |
| Зарядная станция                             | 54,89                               | 0,05                                                           | 3                                 | ТМЗ                            | 1000                 | 2                            | 1                     |
| Цех окраски                                  | 910,22                              | 0,19                                                           | 2                                 |                                |                      |                              |                       |
| Прессовый цех                                | 3017,19                             | 0,28                                                           | 2                                 | ТМЗ                            | 1000                 | 2                            | 2                     |
| Кузнечный цех                                | 1949,06                             | 0,2                                                            | 2                                 |                                |                      |                              |                       |
| Деревообделочный цех                         | 102,58                              | 0,02                                                           | 2                                 | ТМЗ                            | 1600                 | 2                            | 1                     |
| Ремонтно-механический цех                    | 135,10                              | 0,13                                                           | 3                                 |                                |                      |                              |                       |
| Лабораторный блок                            | 30,49                               | 0,02                                                           | 2                                 |                                |                      |                              |                       |
| Цех товаров народного<br>потребления         | 608,93                              | 0,2                                                            | 2                                 | ТМЗ                            | 400                  | 2                            | 1                     |

### 3 Определение данных для выбора схемы внешнего электроснабжения и трансформаторов ГПП предприятия

Выбор оптимальной схемы внешнего электроснабжения зависит от наличия источников питания, уровнями напряжения на них, удаленности предприятия от этих источников, запаса свободной мощности у источников и другими факторами. Для промпредприятия с потребителями 1-2 категории и суммарной мощностью потребления в десятки/сотни киловатт чаще всего выбирают схемы с одной или двумя линиями высокого напряжения (35кВ или 110 кВ) с сооружением главной понизительной подстанции (ГПП). Однако при локализации большей части мощности потребления предприятием в нескольких крупных цехах, находящихся на значительном расстоянии друг от друга, предпочтительнее выбирать схемы «глубокого ввода» внешнего электроснабжения. При этом варианте линии питания с напряжением 35/110 кВ заводятся непосредственно на распределительные подстанции (РП), сооружаемые при этих цехах.

Для выбора оптимального варианта внешнего электроснабжения предварительно:

а) определяем приближенно потери активной мощности в цеховых трансформаторах «по формуле

$$\Delta P_T = N(0,02S_{T\text{ ном}}) ,$$

где  $N$  – количество трансформаторов на ТП;

$S_{T\text{ ном}}$  – номинальная мощность трансформатора ТП.» [5]

Суммарные потери в целом по предприятию составят:

$$\begin{aligned} \Delta P_{T\Sigma} = \Delta P_{T1} + \Delta P_{T2} + \Delta P_{T3} + P_{T4} + \Delta P_{T5} = & 2 \cdot 0,02 \cdot 1600 + 2 \cdot 0,02 \cdot 1000 + \\ & + 4 \cdot 0,02 \cdot 1000 + 2 \cdot 0,02 \cdot 1600 + 2 \cdot 0,02 \cdot 630 = 273,2 \text{ кВт} \end{aligned}$$

б) Расчетную (максимальную) нагрузку предприятия определим «по формуле:

$$P_{PI} = P_{PH} + P_{PB} + P_{OCB} + \Delta P_{T\Sigma} = 6382.2 + 0 + 264 + 273.2 = 6919.4 \text{ кВт} ,$$

где  $P_{PH}$  – расчетная активная низковольтная нагрузка предприятия;

$P_{PB}$  – расчетная активная высоковольтная нагрузка предприятия;

$P_{OCB}$  – расчетная активная нагрузка освещения предприятия;

$\Delta P_{T\Sigma}$  – суммарные потери активной мощности в трансформаторах ТП.» [6]

в) Рациональное напряжение питания предприятия определим «по формуле Стилла:

$$U_{PAЦ i} = 4,34\sqrt{L_i + 0,016P_{PI}} = 4,34\sqrt{1 + 0,016 \cdot 6919,4} = 45,9 \text{ кВ}.$$

где  $L_i$  – длина питающей ГПП линии;

$P_{PI}$  – расчетная (максимальная) нагрузка предприятия.» [7]

Исходя из расчетного значения  $U_{PAЦ i}$  принимаем напряжение внешнего электроснабжения 35 кВ и схему ГПП с выключателями на высокой стороне и неавтоматической перемычкой (рисунок 3.1).

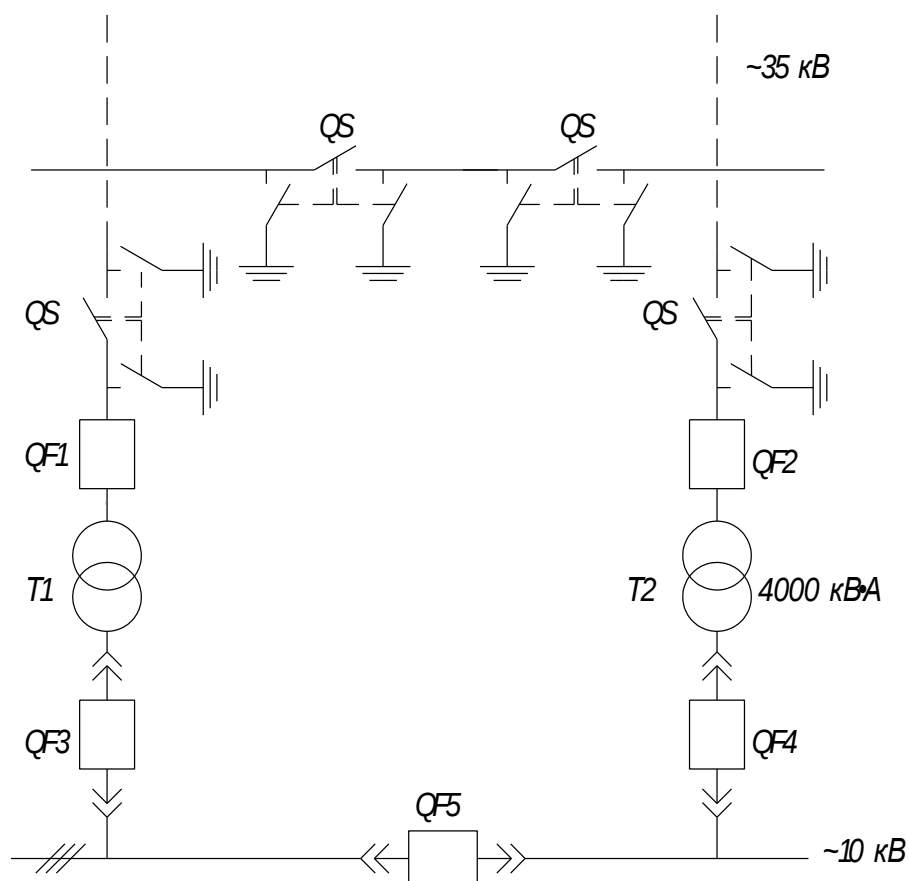


Рисунок 3.1 - Схема подключения ГПП предприятия на напряжение 35 кВ

Для выбора трансформаторов главной понизительной подстанции с достаточной степенью точности рассчитываем полную нагрузку предприятия «по формуле:

$$S_{\text{ПП}i} = \sqrt{P_{\text{ПП}}^2 + Q_{\text{ЭС}i}^2},$$

где  $Q_{\text{ЭС}i}$  – экономически целесообразная реактивная мощность потребляемая предприятием из энергосистемы и определяемая как

$$Q_{\text{ЭС}i} = P_{\text{ПП}} \cdot \text{tg}\varphi_i = 6919,4 \cdot 0,23 = 1591,5 \text{ квар},$$

где  $\text{tg}\varphi_i$  – коэффициент реактивной мощности.» [8]

Для напряжения питания 35 кВ  $\text{tg}\varphi_i$  принимается равным 0,23.

Таким образом полная расчетная нагрузка предприятия составит:

$$S_{P\Pi i} = \sqrt{P_{P\Pi}^2 + Q_{\Sigma C i}^2} = \sqrt{6919,4^2 + 1591,5^2} = 7100 \text{ кВА}.$$

Потребление электроэнергии:

$$W = 6,919 \cdot (1 \cdot 0,3 + 0,95 \cdot 0,7 + 0,85 \cdot 0,2 + 0,81 \cdot 0,8 + 0,78 \cdot 2 + 0,71 \cdot 1,2 + 0,64 \cdot 0,8 + 0,44 \cdot 1,3 + 0,32 \cdot 0,9 + 0,25 \cdot 0,56) \cdot 10^3 = 39486,7 \text{ МВт} \cdot \text{ч}.$$

Продолжительность максимальной годовой нагрузки составит:

$$T_{\text{м}} = \frac{W}{P_{P\Pi}} = \frac{39486,7}{6,919} = 5707 \text{ час}.$$

Годовой график изменения электрической нагрузки по продолжительности приведен на рисунке 3.2.

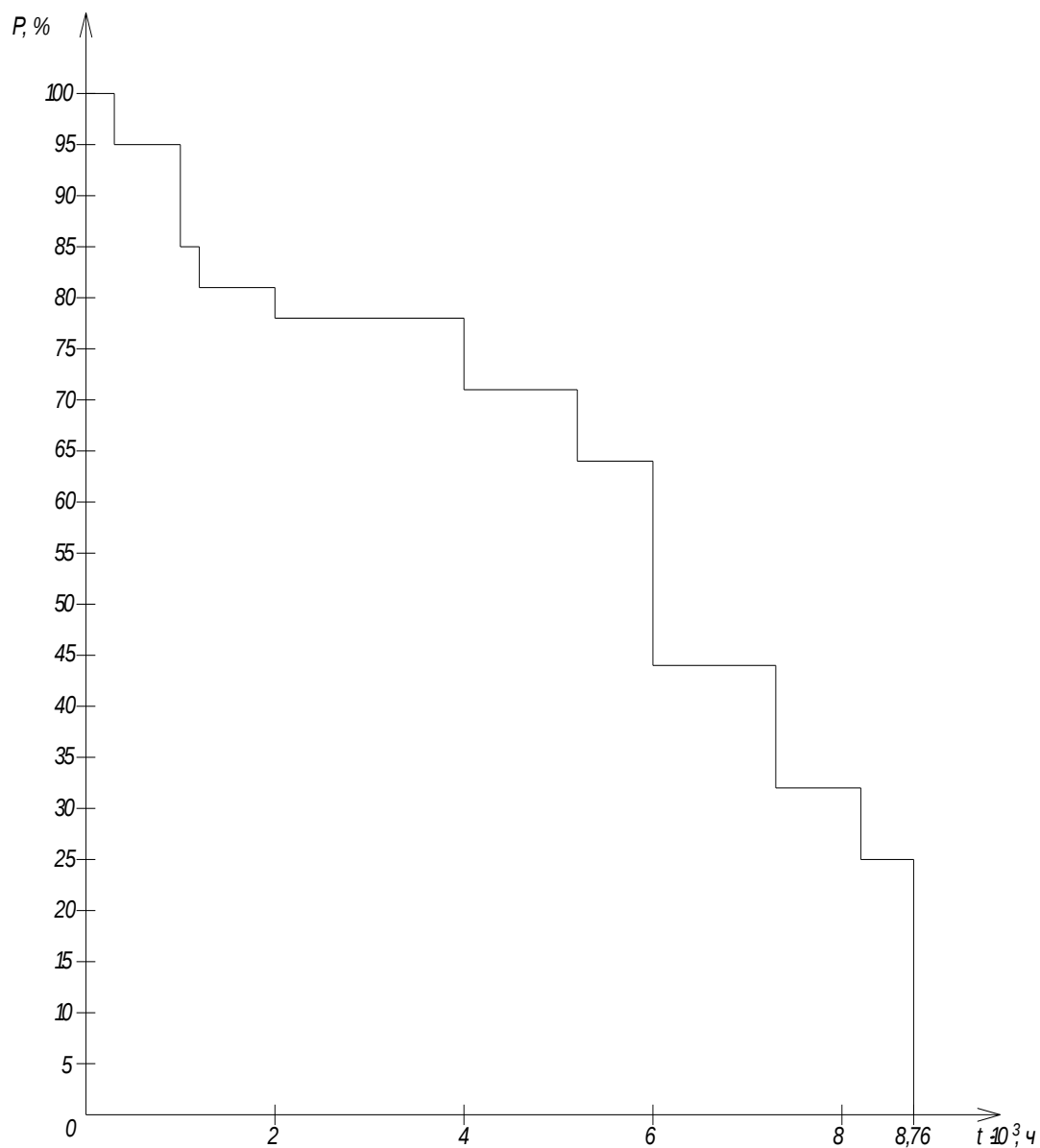


Рисунок 3.2 - Годовой график изменения нагрузки по продолжительности

Для подбора трансформаторов ГПП промпредприятия рассчитываем ориентировочную номинальную мощность «по формуле:

$$S_{НОМ Т} \geq \frac{S_{ПИ} \cdot K_{1-2}}{K_{ПЕР}}, \text{ кВА}$$

где  $K_{1-2}$  – коэффициент участия в нагрузке потребителей 1-й и 2-й категории;

$K_{ПЕР}$  – коэффициент приближенной допустимой аварийной перегрузки» [9]

Для трансформаторов ГПП принимаем  $K_{1-2}=0,75$ ;  $K_{ПЕР}=1,4$ ; таким образом:

$$S_{НОМ Т} \geq \frac{S_{ПП i} \cdot K_{1-2}}{K_{ПЕР}} = \frac{7100 \cdot 0,75}{1,4} = 3803,6 \text{ кВА}$$

По условию:

$$S_{НОМ Т2} > S_{НОМ Т1} \geq S_{НОМ Т} .$$

для последующего анализа вариантов выбора принимаем трехфазные (Т) трансформаторы, с естественной циркуляцией воздуха и масла (М), регулируемым напряжением под нагрузкой (Н), типовой мощностью 4000 кВА ( $S_{НОМ Т1}$ ) и 6300 кВА ( $S_{НОМ Т2}$ ), климатического исполнения и категории размещения по ГОСТ 15150-69 (У1).

Таблица 3.1 – Технические данные трансформаторов

| Тип               | $S_{НОМ Т}$<br>кВА | Каталожные данные        |      |           |                      |                      |             |
|-------------------|--------------------|--------------------------|------|-----------|----------------------|----------------------|-------------|
|                   |                    | $U_{НОМ}$<br>обмоток, кВ |      | $u_k, \%$ | $\Delta P_k,$<br>кВт | $\Delta P_x,$<br>кВт | $I_x,$<br>% |
|                   |                    | ВН                       | НН   |           |                      |                      |             |
| ТМН 4000/35/10-У1 | 4000               | 35                       | 10,5 | 7,5       | 33,5                 | 6,7                  | 1           |
| ТМН 6300/35/10-У1 | 6300               | 35                       | 10,5 | 7,5       | 46,5                 | 9,25                 | 0,9         |

Для варианта с трансформатором ТМН 4000/35/10-У1:

Приведенные потери мощности для этого типа трансформаторов находим из выражения:

$$P'_T = P'_x + \kappa_3^2 \cdot P'_\kappa = 8,7 + 1,775^2 \cdot 48,5 = 161,5 \text{ кВт}$$

«где  $P'_x = \Delta P_x + \kappa_{un} \cdot Q_x = 6,7 + 0,05 \cdot 40 = 8,7$  кВт – приведенные потери активной мощности трансформатора для режима холостого хода (х.х.);[9]

$\Delta P_x$  – паспортные данные по потерям активной мощности;

$\kappa_{un} = 0,02 \dots 0,2$  кВт/квар – коэффициент потерь на удалённость потребителей. Принимаем « $\kappa_{un} = 0,05$  кВт/квар»;

$Q_x = \frac{I_x(\%)}{100} \cdot S_{НОМ\ T} = \frac{1}{100} \cdot 4000 = 40, \text{квар}$  – потери реактивной мощности трансформатора для режима х.х. (квар);

$I_x(\%)$  – ток холостого хода трансформатора, %;» [9]

Коэффициент загрузки для трансформатора:

$$\kappa_3 = \frac{S_{ПП\ i}}{S_{НОМ\ T}} = \frac{7100}{4000} = 1,775$$

где « $S_{ПП\ i}$  – расчётная нагрузка трансформатора, кВА;

$S_{НОМ\ T}$  – номинальная мощность трансформатора, кВА.» [9]

Приведенные потери в трансформаторе при коротком замыкании составят

а) -для реактивной мощности:

$$Q_\kappa = \frac{U_\kappa(\%)}{100} \cdot S_{НОМ\ T} = \frac{7,5}{100} \cdot 4000 = 300 \text{ квар}$$

где  $U_\kappa(\%)$  – напряжение к.з. трансформатора, %; принимается из таблицы 3.1.

б) -для активной мощности:

$$P'_\kappa = \Delta P_\kappa + \kappa_{un} \cdot Q_\kappa = 33,5 + 0,05 \cdot 300 = 48,5 \text{ кВт}$$

Потери электроэнергии –  $\Delta W_{nc}$  в трансформаторе определяем из обобщенного выражения: «

$$\begin{aligned}\Delta W_{nc} &= \sum \Delta W_{xi} + \sum W_{ki} = \sum \Delta W_{xi} + \sum \Delta W_{k.ei} + \sum \Delta W_{k.H_i} + \sum \Delta W_{k.H_{2i}} = \\ &= \sum n_i \cdot P'_x \cdot T_i + \sum_{i=1}^k \left( \frac{1}{n} \cdot P'_{k.e} \cdot k_{3.ei}^2 \cdot T_i \right)\end{aligned}$$

где  $i$  – порядковый номер ступени из графика нагрузки,  $i = 1, 2, 3 \dots k$  (ступени нагрузки определяем по графику загрузки обмотки высшего напряжения трансформатора);  $n_i$  – число трансформаторов ПС, находящихся в работе на  $i$ -ой ступени годового графика нагрузки определенное с учетом значения экономической нагрузки  $S_{э.пс}$ ;  $k_{3.ei} = \frac{S_{B_i}}{S_{НОМ\ T}}$ , – коэффициенты загрузки обмоток высшего напряжения на  $i$ -ой ступени;  $S_{B_i}$  – расчетные мощности нагрузки соответствующих обмоток трансформаторов из графиков на  $i$ -той ступени;  $T_i$  – продолжительность нахождения нагрузки  $S_i$  на  $i$ -ой ступени.» [9]

Экономичную нагрузку трансформаторов определим из условия:

$$\begin{aligned}S_{\mathcal{O}} &= S_{НОМ\ T} \cdot \sqrt{n \cdot (n-1) \cdot \frac{P'_x}{P'_k}} \\ S_{\mathcal{O}} &= 4000 \cdot \sqrt{2 \cdot (2-1) \cdot \frac{8,7}{48,5}} = 2396 \text{ кВА}\end{aligned}$$

Затраты на потери электроэнергии в трансформаторах за год составят:

$$И_{\mathcal{O}} = \Delta W_{nc} \cdot C_{\mathcal{O}} = 464932,2 \cdot 1,53 = 711720,2 \text{ рублей,}$$

Таблица 3.2 – Расчетные потери электроэнергии в обмотках трансформатора ТМН4000/35/10-У1

| Степень нагрузки | $S_{B_i}$ ,<br>кВА | $n_i$ | $T_i$ ,<br>час. | $\Delta W_{xi}$ ,<br>кВт·ч                                     | $k^2_{3.6i}$ | $\Delta W_{к.в.и}$ ,<br>кВт  |
|------------------|--------------------|-------|-----------------|----------------------------------------------------------------|--------------|------------------------------|
| 1                | 7100               | 2     | 300             | 5220                                                           | 1,775        | 22920,8                      |
| 2                | 6745               | 2     | 700             | 12180                                                          | 1,686        | 48267,4                      |
| 3                | 6035               | 2     | 200             | 3480                                                           | 1,509        | 11040,2                      |
| 4                | 5751               | 2     | 800             | 13920                                                          | 1,438        | 40102,2                      |
| 5                | 5538               | 2     | 2000            | 34800                                                          | 1,385        | 92966,8                      |
| 6                | 5041               | 2     | 1200            | 20880                                                          | 1,260        | 46217,5                      |
| 7                | 4544               | 2     | 800             | 13920                                                          | 1,136        | 25035,6                      |
| 8                | 3124               | 2     | 1300            | 22620                                                          | 0,781        | 19229,0                      |
| 9                | 2272               | 1     | 900             | 7830                                                           | 0,568        | 14082,5                      |
| 10               | 1775               | 1     | 560             | 4872                                                           | 0,444        | 5348,2                       |
|                  |                    |       |                 | $\sum \Delta W_X = 139722$                                     |              | $\sum \Delta W_K = 325210,2$ |
|                  |                    |       |                 | $\Delta W_{nc} = \sum \Delta W_X + \sum \Delta W_K = 464932,2$ |              |                              |

«где  $\Delta W_{nc}$  – годовые потери электроэнергии в трансформаторах, кВт·ч;

$C_3$  – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб/кВт·ч» [10].

$$C_3 = \frac{\alpha}{T_M} + \beta = \frac{3600}{5707} + 0,9 = 1,53 \frac{\text{руб}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$$

где « $\alpha$  – основная ставка тарифа за каждый кВт договорной мощности;  $\beta$  – дополнительная ставка тарифа за каждый кВт·ч активной энергии по счётчику.» [10]

Приведенные затраты составят:

$$Z_{np} = E_H \cdot K + I_o + I_3 = 0,25 \cdot 4400000 + 413600 + 711720,2 = 2225320 \text{ руб.}$$

«где  $K$  – капитальные затраты на оборудование ПС (принимаются в размере стоимости трансформаторов), руб;  $E_H$  – нормативный коэффициент дисконта;  $I_o$  – годовые отчисления, руб» [10].

Годовые отчисления  $I_0$  рассчитаем по формуле:

$$I_0 = p_{\text{сум}} \cdot K = 0,094 \cdot 4400000 = 413600 \text{ руб.}$$

«где  $p_{\text{сум}}$  – суммарный коэффициент отчислений, для силового оборудования 35-150 кВ  $p_{\text{сум}} = 0,094$ » [10].

Произведем те же расчеты для варианта ГПП с трансформаторами типа ТМН 6300/35/10-У1:

$$P'_T = P'_x + \kappa_3^2 \cdot P'_\kappa = 12,085 + 1,13^2 \cdot 70,125 = 101,6, \text{ кВт},$$

$$P'_x = \Delta P_x + \kappa_{\text{ин}} \cdot Q_x = 9,25 + 0,05 \cdot 56,7 = 12,085, \text{ кВт};$$

$$Q_x = \frac{I_x(\%)}{100} \cdot S_{\text{НОМ Т}} = \frac{0,9}{100} \cdot 6300 = 56,7 \text{ квар}$$

$$\kappa_3 = \frac{S_{\text{ПИ i}}}{S_{\text{НОМ Т}}} = \frac{7100}{6300} = 1,13.$$

$$P'_\kappa = \Delta P_\kappa + \kappa_{\text{ин}} \cdot Q_\kappa = 46,5 + 0,05 \cdot 472,5 = 70,125, \text{ кВт};$$

$$Q_\kappa = \frac{U_x(\%)}{100} \cdot S_{\text{НОМ Т}} = \frac{7,5}{100} \cdot 6300 = 472,5, \text{ квар};$$

Экономичная нагрузка трансформаторов:

$$S_\ominus = 6300 \cdot \sqrt{2 \cdot (2 - 1) \cdot \frac{12,085}{70,125}} = 3698,6 \text{ кВА}.$$

Таблица 3.3 - Расчетные потери электроэнергии в обмотках трансформатора ТМН 6300/35/10-У1

| Степень нагрузки | $S_{B_i}$ ,<br>кВА | $n_i$ | $T_i$ ,<br>час. | $\Delta W_{xi}$ ,<br>кВт·ч | $k^2_{3.6i}$ | $\Delta W_{\kappa.6i}$ ,<br>кВт |
|------------------|--------------------|-------|-----------------|----------------------------|--------------|---------------------------------|
|------------------|--------------------|-------|-----------------|----------------------------|--------------|---------------------------------|

|    |      |   |      |                                                                |       |                              |
|----|------|---|------|----------------------------------------------------------------|-------|------------------------------|
| 1  | 7100 | 2 | 300  | 7251                                                           | 1,127 | 13359,8                      |
| 2  | 6745 | 2 | 700  | 16919                                                          | 1,071 | 28133,5                      |
| 3  | 6035 | 2 | 200  | 4834                                                           | 0,958 | 6435,0                       |
| 4  | 5751 | 2 | 800  | 19336                                                          | 0,913 | 23374,3                      |
| 5  | 5538 | 2 | 2000 | 48340                                                          | 0,879 | 54187,3                      |
| 6  | 5041 | 2 | 1200 | 29004                                                          | 0,8   | 26938,7                      |
| 7  | 4544 | 2 | 800  | 19336                                                          | 0,721 | 14592,5                      |
| 8  | 3124 | 1 | 1300 | 15710,5                                                        | 0,496 | 22416                        |
| 9  | 2272 | 1 | 900  | 10876,5                                                        | 0,361 | 8208,3                       |
| 10 | 1775 | 1 | 560  | 6767,6                                                         | 0,282 | 3117,3                       |
|    |      |   |      | $\sum \Delta W_X = 178374,6$                                   |       | $\sum \Delta W_K = 200762,5$ |
|    |      |   |      | $\Delta W_{nc} = \sum \Delta W_X + \sum \Delta W_K = 379137,1$ |       |                              |

Затраты на годовые потери электроэнергии в трансформаторах:

$$I_{\text{г}} = \Delta W_{nc} \cdot C_{\text{г}} = 379137,1 \cdot 1,53 = 580384,7 \text{ руб.},$$

Приведенные затраты:

$$Z_{np} = 0,25 \cdot 7800000 + 733200 + 580384,7 = 3263585 \text{ руб.}$$

Поскольку сумма приведённых затрат для варианта с трансформаторами номинальной мощности 4 МВА (2 225 320 руб.) меньше суммы приведенных затрат для варианта с трансформаторами номинальной мощности 6,3 МВА (3 263 585 руб.), то для дальнейшего рассмотрения принимаем вариант ГПП с двумя трансформаторами типа ТМН 4000/35/10-У1.

## **4 Определение параметров реактивной мощности в СЭС промпредприятия**

Правильно спроектированная электрическая сеть современного промышленного предприятия должна обеспечивать равенство генерации и потребления как активной, так и реактивной мощности. Главным нормативным показателем поддержания баланса активной мощности служит частота переменного тока, являющаяся общесистемным критерием. Главным нормативным показателем поддержания баланса реактивной мощности служит уровень напряжения, который существенно разный для каждого узла и ступени номинального напряжения. Причем недопустимые уровни напряжения в узлах энергосистемы часто возникают из-за местного дефицита реактивной мощности. Вследствие этого (в отличие от баланса активной мощности) баланс и резерв реактивной мощности должен быть обеспечен не только в целом по энергосистеме, но и в узлах нагрузки. Выбор компенсирующих устройств (КУ) для устранения/снижения дисбаланса должен обеспечивать наибольшую экономичность, которая оценивается по приведенным затратам на дооборудование компенсирующими устройствами реактивной мощности и достигаемой при этом экономии за счет снижения потерь в СЭС промпредприятия.

### **4.1 Расчет и выбор КУ для ТП группы подразделений предприятия**

Для ТП групп подразделений предприятия уже известны значения активных и реактивных расчетных мощностей.  $Q_{\min}$ , равное для машиностроительных предприятий 40% от расчетного максимума, определяемого по годовому графику нагрузки. Значения расчетных мощностей  $P_{p\Sigma}$ ,  $Q_{p\Sigma}$ ,  $Q_{\min}$  сведены в таблицу 4.1:

Таблица 4.1 – Значения расчетных мощностей

| Узлы СЭС предприятия              | $P_{p\Sigma}$<br>кВт | $Q_{p\Sigma}$<br>квар | $Q_{\min}$<br>квар |
|-----------------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|
| Компрессорная                     | 1114,24              | 636,71                | 287,44             |
| Блок складов                      |                      |                       |                    |
| Административный корпус           |                      |                       |                    |
| Транспортный цех                  | 740,9                | 703,18                | 314,03             |
| Зарядная станция                  |                      |                       |                    |
| Цех окраски                       |                      |                       |                    |
| Прессовый цех                     | 2200,55              | 1921,37               | 834,07             |
| Кузнечный цех                     | 1590,34              | 1705,85               | 733,48             |
| Деревообделочный цех              |                      |                       |                    |
| Ремонтно-механический цех         |                      |                       |                    |
| Лабораторный блок                 | 472,4                | 604,22                | 255,46             |
| Цех товаров народного потребления |                      |                       |                    |

Потери в трансформаторах прессового цеха:

$$\Delta P_T = N_T \cdot (P_{xx} + K_3^2 \cdot P_{\kappa 3}) = 4 \cdot (2,45 + 0,7^2 \cdot 12,2) = 33,72 \text{ кВт};$$

$$\Delta Q_T = N_T \cdot (i_0 + K_3^2 \cdot U_{\kappa 3}) \cdot \frac{S_n}{100} = 4 \cdot (1,4 + 0,7^2 \cdot 5,5) \cdot \frac{1000}{100} = 163,8 \text{ квар}$$

Расчетная нагрузка прессового цеха с учетом потерь в трансформаторах  
ТП:

$$P_p = P_{p\Sigma} + \Delta P_T = 2200,55 + 33,72 = 2234,27 \text{ кВт};$$

$$Q_p = Q_{p\Sigma} + \Delta Q_T = 1921,37 + 163,8 = 2085,17 \text{ квар}$$

Реактивная мощность, передаваемая в сеть в режиме наибольшей активной нагрузки, для прессового цеха принимается равной «меньшему из значений, полученных по формулам» [11]:

$$Q'_{\text{э1}} = Q_p - 0,7 \cdot Q_{\text{сд}} = 2085,17 \text{ кВар}$$

$$Q''_{\text{э1}} = \alpha \cdot P_p = 0,28 \cdot 2234,27 = 625,6 \text{ кВар}$$

где  $\alpha = 0.28$ ;  $Q_{\text{сд}} = 0$ .

По указанному критерию для дальнейших расчетов принимаем значение  $Q_{\text{э1}} = 625,6 \text{ кВар}$ .

Реактивная мощность, передаваемая в сеть в режиме наименьшей активной нагрузки, для прессового цеха принимается из диапазона значений, «верхняя и нижняя границы которого определяются по формулам» [11]:

$$Q'_{\text{э2}} = Q_{\text{min}} + Q_{\text{к}} = 834,07 \text{ кВар}$$

$$Q''_{\text{э2}} = Q_{\text{min}} - Q_{\text{кд}} = Q_{\text{min}} - (Q_p - Q_{\text{э1}}) = 834,07 - (2085,17 - 625,6) = -625,5 \text{ кВар}$$

где  $Q_{\text{к}} = 0$ ;

Для дальнейших расчетов принимаем значение мощности  $Q_{\text{э2}} = 834,07 \text{ кВар}$  (с учётом повышенного напряжения при минимальных нагрузках).

Расчетная суммарная мощность КУ для прессового цеха составит:

$$Q_{\text{ку. max}} = 1,1 \cdot Q_p - Q_{\text{э1}} = 1,1 \cdot 2085,17 - 625,6 = 1668,09 \text{ кВар}$$

$$Q_{\text{ку. min}} = Q_{\text{min}} - Q_{\text{э2}} = 834,07 - 834,07 = 0 \text{ кВар}.$$

Расчеты данных по остальным узлам СЭС предприятия выполнены аналогичным образом и сведены в таблицы 4.2 и 4.3.

Таблица 4.2 – Расчётные данные по узлам СЭС

[illegible]

Таблица 4.3 – Расчётные данные по узлам СЭС

| Узлы СЭС предприятия              | $\Delta P_T$<br>кВт | $\Delta Q_T$<br>квар | $Q_{ку\max}$<br>квар | $Q_{ку\min}$<br>квар |
|-----------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Компрессорная                     | 16,86               | 81,9                 | 473,76               | 0                    |
| Блок складов                      |                     |                      |                      |                      |
| Административный корпус           |                     |                      |                      |                      |
| Транспортный цех                  | 16,86               | 81,9                 | 651,42               | 0                    |
| Зарядная станция                  |                     |                      |                      |                      |
| Цех окраски                       |                     |                      |                      |                      |
| Прессовый цех                     | 33,72               | 163,8                | 1668,09              | 0                    |
| Кузнечный цех                     | 24,24               | 127,84               | 1564,98              | 0                    |
| Деревообделочный цех              |                     |                      |                      |                      |
| Ремонтно-механический цех         |                     |                      |                      |                      |
| Лабораторный блок                 | 7,49                | 34,44                | 568,16               | 0                    |
| Цех товаров народного потребления |                     |                      |                      |                      |

В соответствии с результатами проведенных расчетов принимаем, что все КУ должны быть регулируемые.

Расчеты для прессового цеха:

Из сети 6/10 кВ в сеть напряжением до 1кВ необходимо передать без компенсации реактивную мощность:

$$Q_{эн} = Q_{э1} - (Q_p - Q_{p\Sigma}) = 625,6 - (2085,17 - 1921,37) = 461,8 \text{ квар}.$$

Получаемая из сети 6/10 кВ в сеть до 1кВ реактивная мощность:

$$Q_T = \sqrt{N_T \cdot K_3 \cdot S_{н.Т}^2 - P_{p\Sigma}^2} = \sqrt{4 \cdot 0,7 \cdot 1000^2 - 2200,55^2} = 1731,35 \text{ квар}.$$

Мощность КУ для установки на стороне до 1кВ:

$$Q_{KV.n} = Q_{p\Sigma} - Q_T = 1921,37 - 1731,35 = 190,02 \text{ квар.}$$

Расчетная мощность УК РМ для установки на уровне 6/10 кВ:

$$Q_{KV.6} = Q_{KV.max} - Q_{KV.n} = 1668,09 - 190 = 1478,09 \text{ квар.}$$

Установка УК РМ на стороне 6/10кВ экономически целесообразна, так как  $Q_{KV.6} > 800$ квар. Результаты расчетов по всем узлам предприятия представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Расчетные данные по установке УК РМ на стороне 6/10 кВ

| Узлы СЭС предприятия              | $Q_{эн}$<br>квар | $Q_T$<br>квар | $Q_{ку н}$<br>квар | $Q_{ку в}$<br>квар |
|-----------------------------------|------------------|---------------|--------------------|--------------------|
| Компрессорная                     | -                | -             | -                  | -                  |
| Блок складов                      |                  |               |                    |                    |
| Административный корпус           |                  |               |                    |                    |
| Транспортный цех                  | -                | -             | -                  | -                  |
| Зарядная станция                  |                  |               |                    |                    |
| Цех окраски                       |                  |               |                    |                    |
| Прессовый цех                     | 461,8            | 1731,35       | 190                | 1478,1             |
| Кузнечный цех                     | 324,24           | 1577,47       | 128,38             | 1436,6             |
| Деревообделочный цех              |                  |               |                    |                    |
| Ремонтно-механический цех         |                  |               |                    |                    |
| Лабораторный блок                 | 99,93            | 300,73        | 303,49             | 264,67             |
| Цех товаров народного потребления |                  |               |                    |                    |

В соответствии с результатами проведенных расчетов можно принять целесообразность компенсации реактивной мощности по высокой стороне только для ТП прессового цеха и для ТП группы, в которую входят кузнечный, деревообделочный и ремонтно-механический цеха. Распределение КУ по цеховым ТП приведено в таблице 4.5

Таблица 4.5 – Расчетные данные и принятые к установке УК РМ по ТП подразделений предприятия.

| Узлы СЭС предприятия              | № ТП | Расчетная нагрузка квар | Расчетная мощность |                   | Принимаемая мощность |                   | Количество и тип УК РМ                        |
|-----------------------------------|------|-------------------------|--------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-----------------------------------------------|
|                                   |      |                         | УК РМ для ВН квар  | УК РМ для НН квар | УК РМ для ВН квар    | УК РМ для НН квар |                                               |
| Компрессорная                     | ТП1  | 718,61                  | -                  | 473,76            | -                    | 2 х 220           | 2 х АКУ 0,4-220-20У3                          |
| Блок складов                      |      |                         |                    |                   |                      |                   |                                               |
| Административный корпус           |      |                         |                    |                   |                      |                   |                                               |
| Транспортный цех                  | ТП2  | 785,08                  | -                  | 651,42            | -                    | 2 х 325           | 2 х АКУ 0,4-325-25У3                          |
| Зарядная станция                  |      |                         |                    |                   |                      |                   |                                               |
| Цех окраски                       |      |                         |                    |                   |                      |                   |                                               |
| Прессовый цех                     | ТП3  | 1042,6                  | -                  | 834,05            | -                    | 2 х 425           | 4 х УК РМ-0,4-425-25                          |
|                                   | ТП4  | 1042,6                  |                    | 834,05            |                      | 2 х 425           |                                               |
| Кузнечный цех                     | ТП5  | 1833,69                 | -                  | 1564,98           | -                    | 2 х (350+425)     | 2 х УК РМ-0,4-350-25,<br>2 х УК РМ-0,4-425-25 |
| Деревообделочный цех              |      |                         |                    |                   |                      |                   |                                               |
| Ремонтно-механический цех         |      |                         |                    |                   |                      |                   |                                               |
| Лабораторный блок                 | ТП6  | 638,66                  | -                  | 568,16            | -                    | 2 х 275           | 2 х УК РМ-0,4-275-25                          |
| Цех товаров народного потребления |      |                         |                    |                   |                      |                   |                                               |

## 4.2 Расчет рабочих токов в СЭС с учетом применения КУ РМ

Применение КУ РМ позволяет:

- снизить расходы на электроэнергию;
- улучшить показатели по напряжению;
- уменьшить поперечное сечение проводов и/или кабелей СЭС за счет улучшения фактора мощности. Или, в случае уже проложенной линии электропередачи, увеличить передаваемую по ней мощность.

С учетом применения указанных в таблице 4.5 КУ РМ рассчитаем значения реактивной и полной мощности, рабочих токов в элементах СЭС промпредприятия:

Для прессового цеха:

$$Q_{pk} = Q_p - (Q_{ку\ вн} + Q_{ку\ вн}) = 2085,17 - (1478,1 + 190) = 417,1 \text{ квар};$$

$$S_{pk} = \sqrt{P_p + P_o^2 + Q_{pk}^2} = \sqrt{2234,26 + 62,6^2 + 417,1^2} = 2334,42 \text{ кВА};$$

$$I_p = \frac{S_{pk}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{2334,42}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 128,36 \text{ А}.$$

Результаты расчетов для узлов СЭС представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Реактивная и полная мощности, рабочий ток с учетом КУ РМ

| Узлы СЭС<br>предприятия                                            | $P_p + P_o$<br>кВт | $Q_p$<br>квар | $Q_{ку\ вн}$<br>квар | $Q_{ку\ нн}$<br>квар | $Q_{рк}$<br>квар | $S_{рк}$<br>кВА | $I_p$<br>А |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------|----------------------|----------------------|------------------|-----------------|------------|
| Компрессорная<br>Блок складов<br>Административный<br>корпус        | 1170,2             | 718,61        | -                    | 440                  | 278,61           | 1202,91         | 66,14      |
| Транспортный цех<br>Зарядная станция<br>Цех окраски                | 806,87             | 785,08        | -                    | 650                  | 135,08           | 818,1           | 44,98      |
| Прессовый цех                                                      | 2287,19            | 2085,17       | -                    | 834,05               | 1251,12          | 2607,02         | 143,35     |
| Кузнечный цех<br>Деревообделочный<br>Ремонтно-<br>механический цех | 1705,48            | 1833,69       | -                    | 1550                 | 283,69           | 1728,91         | 95,07      |
| Лабораторный блок<br>Цех товаров<br>народного<br>потребления       | 511,73             | 638,66        | -                    | 550                  | 88,66            | 519,36          | 28,56      |

## 5 Выбор марок и сечений кабелей

### 5.1 Расчет параметров кабельных линий по длительно допустимому току и экономической плотности тока, выбор марок кабелей

С учетом имеющихся условий эксплуатации и сравнительной цены кабелей на 10кВ принимаем к рассмотрению марку ААШв – кабель с алюминиевыми жилами, бумажной изоляцией с пропиткой, оболочкой из алюминия и защитного покрова из пластиката. Такой кабель предназначен для эксплуатации в земле (траншее); в сухих или сырых помещениях, как производственного назначения, так и специального (тоннели, каналы, коллекторы и т.п.). Кабели этой марки могут использоваться в местах подверженных вибрации, что достаточно актуально в нашем случае для прокладки кабельных линий (КЛ) питания прессового цеха и кузнечного цеха.

Для проведения расчетов принимаем:

- поправочный коэффициент на температуру окружающей среды  $k_1 = 1,04$
- поправочный коэффициент на рядом положенные кабели  $k_2 = 0,56$ .
- экономическую плотность тока  $J_{э} = 1,2$  для кабелей ААШв принимаем с учетом продолжительности максимальной годовой нагрузки более 5000 часов равной 1,2.

Кабельная линия к ТПЗ (прессовый цех):

Расчёт по длительно допустимому току -

$$I_{\text{продол.расч.}} \leq I_{\text{дл.доп}} ;$$

$$I_{\text{дл.доп}} = k_1 k_2 I_{\text{доп.ном}} = 1,04 \cdot 0,56 \cdot 75 = 43,68 \text{ A};$$

$$S_{\text{дл.доп}} = 16 \text{ мм}^2$$

Расчёт по экономической плотности тока -

$$S_9 = \frac{I_{\text{норм}}}{j_9} = \frac{35,84}{1,2} = 29,86 = 3 \times 10 \text{ мм}^2$$

По результатам расчетов принимаем кабель марки ААШв 3х16,  $r_0 = 0,883 \text{ мм}^2$ ,  $x_0 = 0,259 \text{ мм}^2$ .

Результаты расчетов и выбора сечений КЛ к цеховым ТП представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Выбор сечения и марки кабеля питания ТП

| Узел<br>нагрузки | $I_p$<br>А | $I_{\text{доп.ном}}$<br>А | $k_1$ | $k_1$ | $I_{\text{дл.доп}}$<br>А | $j_9$ | $S_{\text{дл.доп}}$<br>мм <sup>2</sup> | $S_9$<br>мм <sup>2</sup> |
|------------------|------------|---------------------------|-------|-------|--------------------------|-------|----------------------------------------|--------------------------|
| КЛ к ТП №1       | 33,06      | 75                        | 1,04  | 0,56  | 49,08                    | 1,2   | 3х16                                   | 37,08                    |
| КЛ к ТП №2       | 22,48      | 75                        | 1,04  | 0,56  | 49,08                    | 1,2   | 3х16                                   | 37,08                    |
| КЛ к ТП №3       | 35,85      | 75                        | 1,04  | 0,56  | 64,42                    | 1,2   | 3х16                                   | 50,28                    |
| КЛ к ТП №4       | 35,85      | 75                        | 1,04  | 0,56  | 64,42                    | 1,2   | 3х16                                   | 50,28                    |
| КЛ к ТП №5       | 47,53      | 90                        | 1,04  | 0,56  | 46,58                    | 1,2   | 3х25                                   | 36,99                    |
| КЛ к ТП №6       | 14,29      | 75                        | 1,04  | 0,56  | 46,58                    | 1,2   | 3х16                                   | 36,99                    |

## 5.2 Проверочный расчет кабельных линий на потери

Результаты расчетов КЛ на потери активной мощности и на потери напряжения требуются для структурного анализа технологических расходов на передачу и распределение электроэнергии, выявления участков СЭС с повышенными потерями, и принятия мер по снижению потерь электроэнергии. Потери активной мощности в КЛ питания ТП не должны превышать 10% от номинального значения, а предел допустимых потерь напряжения равен 5%. Если расчетные потери активной мощности  $\Delta P$  и потери напряжения  $\Delta U$  будут превышать указанные значения, то необходимо выбрать кабель большего сечения.

Расчетные потери в кабельной линии к ТП №1:

- по активной мощности

$$\Delta P = \frac{(P_p)^2 + (Q_{pk})^2}{U_{ном}^2} \cdot r_0 \cdot l = \frac{1131,1^2 + 278,6^2}{10,5^2} \cdot 0,641 \cdot 0,14 = 1,1 \text{ кВт.}$$

- по напряжению

$$\Delta U_{lj} = \frac{P_p \cdot r_0 + Q_{pk} \cdot x_0}{U_{ном}} \cdot l = \frac{1131,1 \cdot 0,641 + 278,6 \cdot 0,110}{10,5} \cdot 0,14 = 10,1 \text{ В}$$

Проверочные расчеты по остальным КЛ к цеховым ТП выполняются аналогично, результаты заносим в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Потери в КЛ к ТП предприятия

| Узел нагрузки | $r_0$<br>Ом/км | $x_0$<br>Ом/км | $l$<br>км | $\Delta P$<br>кВт | $\Delta U$<br>В | $\Delta P$<br>% | $\Delta U$<br>% |
|---------------|----------------|----------------|-----------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| КЛ к ТП №1    | 0,641          | 0,110          | 0,14      | 1,105             | 44,64           | 0,0262          | 0,4464          |
| КЛ к ТП №2    | 0,641          | 0,110          | 0,30      | 3,381             | 19,34           | 0,0262          | 0,1934          |
| КЛ к ТП №3    | 0,443          | 0,103          | 0,27      | 2,734             | 26,41           | 0,0155          | 0,2641          |
| КЛ к ТП №4    | 0,443          | 0,103          | 0,33      | 3,692             | 35,67           | 0,0210          | 0,3567          |
| КЛ к ТП №5    | 0,641          | 0,110          | 0,48      | 0,298             | 3,79            | 0,0004          | 0,0379          |
| КЛ к ТП №6    | 0,641          | 0,110          | 0,54      | 0,743             | 9,72            | 0,0009          | 0,0972          |

В соответствии с проведенными расчетами приходим к выводу, что все выбранные сечения кабелей удовлетворяют условиям по потерям активной мощности и напряжения, т.к.  $\Delta P < 10\%$  и  $\Delta U < 5\%$ .

## 6 Расчётные параметры токов короткого замыкания в СЭС

Расчеты токов КЗ проводятся для выбора или проверки электрических аппаратов, шин и изоляторов по динамической устойчивости; проектирования заземляющих устройств; выбора (или настройки уставок) устройств релейной защиты и автоматики, и т.д. Для проведения вычислений составляются представленные на рисунке 6.1 однолинейная упрощенная расчетная схема подключения электроустановки, все элементы которой затем замещаются на сопротивления, выраженные в одних и тех же единицах и приведенных к одинаковым условиям.

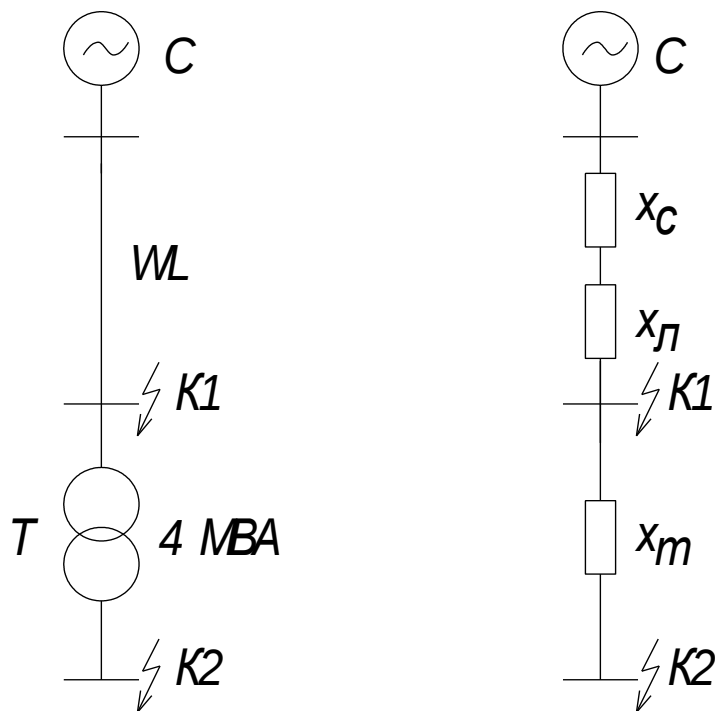


Рисунок 6.1 - Расчетная схема и схема замещения

Расчеты по переводу элементов подключения расчетной схемы в сопротивления схемы замещения:

$$x_{* \delta, c} = \frac{S_{\delta}}{S_{\kappa}} = \frac{100}{1000} = 0,5 ;$$

$$x_{*\bar{6},T_6} = \frac{U_{к.в},\%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{номТ}} = \frac{7,5}{100} \cdot \frac{100}{4} = 1,875 ;$$

$$x_l = \chi_{y\partial} \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{номт}^2} = 0,4 \cdot 1 \cdot \frac{100}{37^2} = 0,03 .$$

Для случая КЗ в точке К1:

Расчетное суммарное сопротивление до точки К1:

$$x_{*рез(\bar{6})} = x_{*\bar{6},c} + x_{*\bar{6},l} = 0,5 + 0,03 = 0,53 .$$

Расчетный базисный ток:

$$I_{\bar{6}} = \frac{S_{\bar{6}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\bar{6}}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 37} = 1,56 \text{ кА}.$$

Расчетное значение начальной действующей периодической составляющей тока короткого замыкания:

$$I_{n,o}^3 = \frac{E''_{*\bar{6}}}{x_{*рез(\bar{6})}} \cdot I_{\bar{6}} = \frac{1}{0,53} \cdot 1,56 = 2,94 \text{ кА}.$$

Расчетный ударный ток к.з. определим по формуле:

$$i_{y\partial} = \sqrt{2} \cdot I_{n,o} \cdot k_{y\partial} = \sqrt{2} \cdot 2,94 \cdot 1,6 = 6,65 \text{ кА}.$$

где  $k_{y\partial} = 1,6$  –ударный коэффициент.

Для случая КЗ в точке К2:

Расчетное суммарное сопротивление до точки К2:

$$x_{*рез(\delta)} = x_{*\delta,c} + x_{*\delta,l} + x_{*\delta,T_\delta} = 0,5 + 0,03 + 1,875 = 2,4 .$$

Расчетный базисный ток:

$$I_\delta = \frac{S_\delta}{\sqrt{3} \cdot U_\delta} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,5 \text{ кА.}$$

Расчетное значение начальной действующей периодической составляющей тока к.з.

$$I_{n,o} = \frac{E''_{*\delta}}{x_{*рез(\delta)}} \cdot I_\delta = \frac{1}{2,4} \cdot 5,5 = 2,29 \text{ кА.}$$

Расчетный ударный ток к.з. определим по формуле:

$$i_{y\delta} = \sqrt{2} \cdot I_{n,o} \cdot k_{y\delta} = \sqrt{2} \cdot 2,29 \cdot 1,4 = 4,53 \text{ кА.}$$

## 7 Оборудование для ГПП

Предварительный выбор оборудования осуществляется по каталогам и справочникам с учетом существующих условий монтажа и эксплуатации, стоимости аппаратов, эксплуатационных расходов на обслуживание и ремонт, анализа конструктивных преимуществ и недостатков и других факторов. Каталожные номинальные параметры выбранных аппаратов должны соответствовать действующим расчетным параметрам в месте установки.

### 7.1 Оборудование на 35 кВ: Проверочные расчеты и выбор

а) Предварительно выбираем элегазовый выключатель ВГБ-35.

Для проверки соответствия каталожных параметров выключателя условиям эксплуатации:

Рассчитаем (с учетом 40 % перегрузки) токи продолжительного режима:

$$I_{\max} = 1,4 \cdot \frac{S_{T,ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = 1,4 \cdot \frac{4000}{\sqrt{3} \cdot 37} = 87,4 \text{ А.}$$

Термическая стойкость при КЗ продолжительности  $t_{откл} = 0,06 \text{ с.}$  составит:

$$B_{\kappa} = I_{n,o}^2 (t_{откл} + T_a) = 2,94^2 (0,06 + 0,05) = 0,95 \text{ кА}^2 \cdot \text{с.}$$

Апериодическую составляющую тока КЗ (максимальное значение) при  $\tau = 0,01 + t_{c,\theta} = 0,01 + 0,04 = 0,05 \text{ с,}$  определяем по формуле:

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{n,o} \cdot e^{-\tau/T_a} = \sqrt{2} \cdot 2,94 \cdot e^{-0,05/0,05} = 1,54 \text{ кА.}$$

Результаты проверочных расчетов соответствия эксплуатационных и каталожных данных сводим в таблицу 7.1.

Таблица 7.1 - Эксплуатационные и каталожные данные выключателя ВГБ-35

| Расчетные данные                                | Технические характеристики ВГБ-35                                                         |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| $U_{ном} = 35 \text{ кВ}$                       | $U_{сет.ном} = 35 \text{ кВ}$                                                             |
| $I_{max} = 87,4 \text{ А}$                      | $I_{ном} = 1000 \text{ А}$                                                                |
| $I_{п,о}^3 = 2,94 \text{ кА}$                   | $I_{откл.ном.} = 20 \text{ кА}$                                                           |
| $i_{a,\tau} = 1,54 \text{ кА}$                  | $i_{a.ном} = (\sqrt{2} \cdot \beta_{нор.} / 100) \cdot I_{откл.ном.} = 9,05 \text{ кА}$   |
| $i_{y\partial.} = 6,65 \text{ кА}$              | $i_{пр.с} = 35 \text{ кА}$                                                                |
| $B_{\kappa} = 0,95 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ | $t_{откл} \langle t_T, \text{ то } I_T^2 \cdot t_{откл} = 12 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ |

Основные преимущества выбранного выключателя ВГБ-35:

- Простой и быстрый монтаж вследствие высокой заводской готовности, небольшой массы и малых габаритов;
- Пригодность для работы в любом цикле АПВ;
- Быстродействие;
- Синхронное размыкание контактов возможно непосредственно перед переходом через нуль;
- Надёжное отключение ёмкостных токов холостых линий;
- Высокая отключающая способность в особо тяжелых условиях (например, отключение неудалённых к.з.);
- Малый износ дугогасительных контактов, высокий механический и коммутационный ресурс;
- Высокий уровень взрыво- и пожаробезопасности;
- Экологическая чистота при эксплуатации.

Основные недостатки:

- Необходимость наличия специального оборудования для наполнения, перекачивания и очистки шестифтористой серы;
- Относительная сложность ряда деталей и узлов конструкции;
- Применение дорогостоящей дугогасящей среды, требующей и дорогих уплотнений;
- Относительно высокая стоимость выключателя.

б) В качестве разъединителя предварительно выбираем РНДЗ-2-35/1000.

Для проверки разъединителя на соответствие каталожных параметров условиям эксплуатации рассчитаем:

При КЗ продолжительностью  $t_{откл} = 0,15$  с. термическая стойкость равна:

$$B_{\kappa} = I_{n,o}^2 (t_{откл} + T_a) = 2,94^2 (0,15 + 0,12) = 2,33 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Проведём проверку соответствия (таблица 7.2) эксплуатационных (с учетом ранее рассчитанных величин) параметров с технической характеристикой разъединителя РНДЗ-2-35/1000.

Таблица 7.2 – Проверка соответствия расчётных (эксплуатационных) данных и паспортных данных разъединителя РНДЗ-2-35/1000

| Эксплуатационные данные                         | Условие соответствия                   | Данные технической характеристики РНДЗ-35/1000                                     |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| $U_{ном} = 35 \text{ кВ}$                       | $U_{ном} \leq U_{сет.ном.}$            | $U_{сет.ном} = 35 \text{ кВ}$                                                      |
| $I_{max} = 87,4 \text{ А}$                      | $I_{max.} \leq I_{ном.};$              | $I_{ном} = 1000 \text{ А}$                                                         |
| $I_{n,o}^3 = 2,94 \text{ кА}$                   | $I_{n,0} \leq I_{пр.с};$               | $I_{пр.с} = 40 \text{ кА}$                                                         |
| $i_{уд.} = 6,65 \text{ кА}$                     | $i_{уд} \leq i_{пр.с}$                 | $i_{пр.с} = 80 \text{ кА}$                                                         |
| $B_{\kappa} = 2,33 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ | $B_{\kappa} \leq I_T^2 \cdot t_{откл}$ | т.к. $t_{откл} < t_T$ , то $I_T^2 \cdot t_{откл} = 25 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ |

Достоинства: высокая отключающая способность, конструктивная простота, пригодность к наружной установке, относительно низкая стоимость.

Недостатки: Необходимость частых профилактических осмотров

Вывод: разъединитель РНДЗ-2-35/1000 соответствует критериям выбора.

в) С учетом стоимостных показателей, необходимого класса точности и конструкции предварительно принимаем к рассмотрению трансформатор тока ТВТ-35-ХІІІ-600/5-04.

Проведём проверку соответствия (таблица 7.3) эксплуатационных (с учетом ранее рассчитанных величин) параметров с паспортными данными трансформатора:

Таблица 7.3 – Паспортные и расчётные данные для трансформатора тока

| Расчетные данные                         | Условие соответствия                               | Паспортные данные<br>ТВТ-35-ХІІІ-600/5-04                                                        |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $U_{ном} = 35 \text{ кВ}$                | $U_{ном} \leq U_{сет.ном.}$                        | $U_{сет.ном} = 35 \text{ кВ}$                                                                    |
| $I_{max} = 87,5 \text{ А}$               | $I_{max} \leq I_{1ном}$                            | $I_{1ном} = 600 \text{ А}$                                                                       |
| $i_{уд} = 6,65 \text{ кА}$               | $i_{уд} \leq K_{эд} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1ном}$ | $K_{эд} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1ном.} = 41 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,6 = 34,8 \text{ кА}$          |
| $B_k = 2,33 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ | $B_k \leq K_T^2 \cdot I_{1ном}^2 \cdot t_T$        | $K_T^2 \cdot I_{1ном.}^2 \cdot t_T = 10^2 \cdot 0,6^2 \cdot 4 = 144 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ |
| $Z_2 = 0,59 \text{ Ом}$                  | $Z_2 < Z_{2ном}$                                   | $Z_{2ном} = 0,8 \text{ Ом}$                                                                      |

В общем виде вторичная нагрузка  $Z_2$  для трансформатора тока складывается из нагрузки от подключенных измерительных/учетных приборов, ( $R_{приб}$ ), от релейной аппаратуры ( $R_p$ ) – в случае её наличия, переходного сопротивления контактов ( $R_{пер}$ ) и сопротивления присоединительных проводов ( $R_{пр}$ ). Кроме того, величина вторичной расчетной нагрузки ( $Z_2$ ) зависит от количества трансформаторов тока (ТТ) и схемы их соединения в случае установки нескольких ТТ. Расчет производим для наиболее нагруженной фазы ТТ. Неизвестным значением при определении вторичной нагрузки является только сопротивление присоединительных проводов  $R_{пр}$ , т.к.  $R_{приб}$  и  $R_p$

принимая согласно паспортных данных установленных приборов,  $R_{пер}$  равно 0,1 Ом. Для предварительного определения максимально допустимой нагрузки ТТ от присоединительных проводов ( $R_{пр доп}$ ) принимаем условие  $Z_2 = Z_{2ном}$ , используя схему включения, паспортные данные приборов, получаем (для соединения ТТ в неполную звезду):

$$Z_2 = R_{приб} + R_p + R_{пер} + \sqrt{3} \cdot R_{пр}$$

или:

$$R_{пр доп} = \frac{Z_{2ном} - (R_{приб} + R_p + R_{пер})}{\sqrt{3}} = \frac{0,8 - (0,28 + 0 + 0,1)}{1,732} = 0,242 \text{ Ом}$$

Для соединительных проводов с медными жилами длиной 30 м расчетное сечение составит:

$$S_p = \frac{l}{\gamma \cdot R_{пр}} = \frac{30}{57 \cdot 0,242} = 2,175 \text{ мм}^2,$$

где  $\gamma$  – удельная проводимость, для меди составляет 57 м/Ом·мм<sup>2</sup>.

Принимаем для проводов стандартное сечение  $S=2,5 \text{ мм}^2$ , тогда:

$$R_{пр} = \frac{l}{\gamma \cdot S} = \frac{30}{57 \cdot 2,5} = 0,21 \text{ Ом}$$

$$Z_2 = R_{приб} + R_p + R_{пер} + \sqrt{3} \cdot R_{пр} = 0,28 + 0 + 0,1 + 0,21 = 0,59 \text{ Ом}$$

Вывод: Трансформатор тока ТВТ-35-ХІІІ-600/5-04 соответствует критериям отбора (таблица 7.3).

## 7.2 Оборудование на 10 кВ: Проверочные расчеты и выбор

Предварительно рассматриваем данные предложений возможных поставщиков комплектных распределительных устройств внутренней и наружной установки (КРУ/КРУН) с точки зрения о возможности долгосрочного сотрудничества; стоимостных показателей: стоимость поставляемого оборудования, стоимость доставки, шефмонтажа и т.д.; удобства монтажа и эксплуатации. По результатам рассмотрения выбираем в качестве поставщика «ГК «Электрощит» - ТМ Самара», г.Самара, Россия и КРУ-СЭЩ-70-10.

Таблица 7.4 – Варианты основной аппаратуры для КРУ-СЭЩ-70-10

| Комплектуемая аппаратура                        | Наименование                        |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Вакуумный выключатель *                         | ВВУ-СЭЩ;<br>ВВМ-СЭЩ;<br>ВВЕ-СЭЩ-10. |
| Элегазовый выключатель                          | LF-1;<br>LF-2;<br>LF-3.             |
| Трансформатор тока *                            | ТОЛ-СЭЩ;<br>ТШЛ-СЭЩ.                |
| Трансформатор тока нулевой последовательности * | ТЗЛК(Р)-СЭЩ                         |
| Трансформатор напряжения *                      | НАЛИ-СЭЩ;<br>ЗНОЛ-СЭЩ;<br>НОЛ-СЭЩ.  |
| Трансформатор собственных нужд *                | ОЛС-СЭЩ;<br>ТЛС-СЭЩ.                |
| Торы нулевой последовательности                 | CSH 120;<br>CSH 200.                |

\*Изделия собственного производства

Предварительно принимаем КРУ-СЭЩ-70-10, имеющие вакуумный выключатель ВВУ-СЭЩ-10, трансформатор тока ТОЛ-СЭЩ, трансформатор напряжения ЗНОЛ-СЭЩ. Проверим соответствие номинальных параметров выбранных приборов расчетным эксплуатационным данным:

Максимальный ток:

$$I_{\max} = 1,4 \cdot \frac{S_{T.\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = 1,4 \cdot \frac{4000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 308 \text{ А}$$

При к.з. продолжительностью  $t_{\text{откл}} = 0,3 \text{ с}$ . термическая стойкость будет

$$B_{\kappa} = I_{n,o}^2 (t_{\text{откл}} + T_a) = 2,29^2 (0,2 + 0,12) = 1,68 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

С учётом ранее рассчитанных эксплуатационных данных и паспортных данных приборов составим сравнительные проверочные таблицы параметров для выключателя (таблица 7.5) и трансформатора тока (таблица 7.6).

Таблица 7.5 – Проверка на соответствие паспортных данных выключателя эксплуатационным условиям

| Эксплуатационные данные                         | Условие соответствия                          | Паспортные данные ВВУ-СЭЩ-П-10-50/1600 У2                                                                    |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$                | $U_{\text{ном}} \leq U_{\text{сет.ном.}}$     | $U_{\text{сет.ном}} = 10 \text{ кВ}$                                                                         |
| $I_{\max} = 308 \text{ А}$                      | $I_{\max} \leq I_{\text{ном}}$                | $I_{\text{ном}} = 1600 \text{ А}$                                                                            |
| $I_{n,o}^3 = 2,29 \text{ кА}$                   | $I_{n,o}^3 \leq I_{\text{откл.ном.}}$         | $I_{\text{откл.ном.}} = 20 \text{ кА}$                                                                       |
| $i_{a,\tau} = 1,8 \text{ кА}$                   | $i_{a,\tau} \leq i_{a.\text{ном}}$            | $i_{a.\text{ном}} = (\sqrt{2} \cdot \beta_{\text{нор.}} / 100) \cdot I_{\text{откл.ном.}} = 8,48 \text{ кА}$ |
| $I_{n,o} = 2,29 \text{ кА}$                     | $I_{n,o} \leq I_{\text{пр.с}}$                | $I_{\text{пр.с}} = 20 \text{ кА}$                                                                            |
| $i_{\text{уд.}} = 4,53 \text{ кА}$              | $i_{\text{уд.}} \leq i_{\text{пр.с}}$         | $i_{\text{пр.с}} = 50 \text{ кА}$                                                                            |
| $B_{\kappa} = 1,68 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ | $B_{\kappa} \leq I_T^2 \cdot t_{\text{откл}}$ | $I_T^2 \cdot t_{\text{откл}} = 20^2 \cdot 0,2 = 80 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$                              |

Вывод: Вакуумный выключатель ВВУ-СЭЩ-П-10-50/1600 У2 соответствует условиям эксплуатации.

Стандартная проверка выбора трансформатора тока проводится на соответствие следующих параметров:

- Напряжение номинальное;
- Номинальный ток первичный;
- Номинальный ток вторичный, для уровня 10 кВ должен быть равен 5 А.;
- Класс точности (соответствие классу точности присоединенных приборов);
- Вторичная нагрузка  $Z_2 < Z_{2ном}$  ( $S_2 < S_{2ном}$  ВА или  $R_2 < R_{2ном}$  Ом);
- Динамическая устойчивость;
- Термическая устойчивость.

Результаты проверки соответствия представлены в таблице 7.6.

Таблица 7.6 – Проверка на соответствие паспортных данных трансформатора тока эксплуатационным условиям

| Эксплуатационные данные                  | Условие соответствия                                | Паспортные данные ТОЛ-СЭЩ                                                                           |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $U_{ном} = 10 \text{ кВ}$                | $U_{ном} \leq U_{сет.ном.}$                         | $U_{сет.ном} = 10 \text{ кВ}$                                                                       |
| $I_{max} = 308 \text{ А}$                | $I_{max} \leq I_{1ном}$                             | $I_{1ном} = 1500 \text{ А}$                                                                         |
| $Z_2 = 0,39 \text{ Ом} *$                | $Z_2 < Z_{2ном}$                                    | $Z_{2ном} = 10 \text{ ВА (при } \cos \varphi = 0,8); = 0,4 \text{ Ом}$                              |
| $i_{yd} = 4,53 \text{ кА}$               | $i_{yd} \leq K_{эд} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1ном.}$ | $K_{эд} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1ном.} = 81 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,5 = 172 \text{ кА}$              |
| $B_k = 1,68 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ | $B_k \leq K_T^2 \cdot I_{1ном.}^2 \cdot t_T$        | $K_T^2 \cdot I_{1ном.}^2 \cdot t_T = 31,5^2 \cdot 1,5^2 \cdot 3 = 6698 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ |

\* Примечание: Вторичная нагрузка  $Z_2 = 0,39 \text{ Ом}$  рассчитана для подключения (по самой нагруженной фазе) амперметра Э-350 (паспортное значение нагрузки 0,5 ВА), счетчика активной энергии СА4У-И672М (паспортное значение нагрузки 2,5 ВА), счетчика реактивной энергии СР4У-И673М (паспортное значение нагрузки 2,5 ВА). Расчетное значение длины соединительных проводов с медными

жилами 10 м., принятое по результату расчета стандартное сечение равно 2,5 мм<sup>2</sup>.

Вывод: Ячейка КРУ с трансформатором тока ТОЛ-СЭЩ-10-01-0,2S/0,5/10P-5/10/15-1500/5 У2 полностью соответствует условиям эксплуатации.

Для использования при измерениях фазных напряжений, контроля изоляции, обеспечения питания контрольно-измерительных приборов, релейных защит, автоматики и приборов учета электроэнергии в шкафы КРУ/КРУН или камеры сборные одностороннего обслуживания (КСО) устанавливаем трансформаторы напряжения. Технические условия выбора ТН: конструкция; номинальное напряжение; класс точности, необходимая номинальная мощность для обеспечения его работы в заданном классе точности.

Выберем ТН для группы приборов технических измерений, состоящей из 2 вольтметров типа Э350 и 4 многофункциональных счетчиков активной и реактивной энергии типа:

Счетчик STAR304/1 С4-5(10) Э4, для которого STAR3 - трёхфазный, 04/ - модель, 1 - класс точности, С – монтаж на вертикальную плоскость, 4 – номер габарита корпуса, 5(10) – базовый и максимальный ток в амперах, Э – электронный, 4 – количество тарифов.

С учетом требуемого класса точности и расчетной потребляемой мощности  $S_{2\Sigma} = 46 \text{ ВА}$  принимаем к установке в ячейку КРУН трансформаторы напряжения ЗНОЛ-СЭЩ-10-1/3-50/100 У2: трансформатор напряжения заземляемый, однофазный, электромагнитный, с литой изоляцией, конструктивного исполнения 0, класса напряжения 10 кВ с двумя вторичными обмотками (класса точности 1 и мощностью 50 ВА для цепей измерения; класса точности 3 и мощностью 100 ВА для цепей защиты), климатического исполнения «У» и категории размещения 2.

Поскольку  $S_{2\Sigma} = 46 \text{ ВА} < S_{\text{ном.}} = 50 \text{ ВА}$  трансформатор будет работать в выбранном классе точности.

## **8 Определение расчетных параметров для защиты силовых трансформаторов**

Наиболее частыми эксплуатационными повреждениями незащищенных силовых трансформаторов являются:

- однофазные замыкания на корпус на стороне ВН;
- межвитковые замыкания;
- 2-х и 3-х фазные КЗ на стороне НН;
- короткие однофазные замыкания за трансформатором
- короткие междуфазные замыкания за трансформатором.

Для защиты силовых трансформаторов мощностью более 1 МВА от внутренних повреждений и нештатных режимов применяют различные виды защит:

- Продольная дифференциальная защита (применяется для трансформаторов мощности 4 МВА и выше);
- Токовая отсечка (применяется при отсутствии дифференциальной защиты);
- Максимальная токовая;
- Газовая защита и другие.

### **8.1 Расчетные параметры токов короткого замыкания (ТКЗ) для трансформаторов**

Определяем сопротивление системы исходя из мощности короткого замыкания на шинах ГПП:

$$X_{C\max} = \frac{U_{H.BH}^2}{S_K^{(3)}} = \frac{37^2}{1500} = 0,913 \text{ Ом};$$

$$X_{C\min} = \frac{U_{H.BH}^2}{S_K^{(3)}} = \frac{37^2}{600} = 2,282 \text{ Ом}.$$

Рассчитываем сопротивление ВЛ:

$$x_{\text{Л}} = x_0 \cdot l = 0,4 \cdot 1 = 0,4 \text{ Ом}.$$

Исходя из номинальной мощности и напряжения короткого замыкания определим сопротивление трансформатора:

$$x_T = \frac{U_{K\%}}{100} \cdot \frac{U_{\text{H.BH}}^2}{S_{\text{T.H}}} = \frac{7,5}{100} \cdot \frac{37^2}{4} = 25,67 \text{ Ом}.$$

Расчетное сопротивление до места короткого замыкания будет:

$$x_{\Sigma} = x_C + x_{\text{Л}} + x_T = 0,913 + 0,4 + 25,67 = 26,98 \text{ Ом}.$$

Трехфазный ток при внешнем коротком замыкании составит:

$$I_{\text{K.BH}}^{(3)} = \frac{U_{\text{H.BH}}}{\sqrt{3} \cdot x_{\Sigma}} = \frac{37}{\sqrt{3} \cdot 26,98} = 0,79 \text{ кА}$$

Найденное значение позволяет определить ток короткого замыкания для всех ступеней трансформатора, например, на ступени 10 кВ:

$$I_{\text{K.HH}}^{(3)} = I_{\text{K.BH}}^{(3)} \cdot \frac{U_{\text{BH}}}{U_{\text{HH}}} = 0,79 \cdot \frac{37}{10,5} = 2,78 \text{ кА};$$

$$\begin{aligned} x_{\text{T.BH min}} &= \frac{U_{\text{K min}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{BH min}}^2}{S_{\text{T.H}}} = \frac{U_{\text{K min}}}{100} \cdot \frac{\left[ U_{\text{BHcp}} \cdot \left( 1 - \frac{\Delta U_{\text{ППН}}}{100} \right) \right]^2}{S_{\text{T.H}}} = \\ &= \frac{8,7}{100} \cdot \frac{\left[ 37 \cdot \left( 1 - \frac{12}{100} \right) \right]^2}{4} = 23,06 \text{ Ом}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
x_{T.BH \max} &= \frac{U_{K \max}}{100} \cdot \frac{U_{BH \max}^2}{S_{T.H}} = \frac{U_{K \max}}{100} \cdot \frac{\left[ U_{BH \text{cp}} \cdot \left( 1 + \frac{\Delta U_{ППН}}{100} \right) \right]^2}{S_{T.H}} = \\
&= \frac{11,76}{100} \cdot \frac{\left[ 37 \cdot \left( 1 + \frac{12}{100} \right) \right]^2}{4} = 50,56 \text{ Ом},
\end{aligned}$$

$\Delta U_{ППН}(\%)$  принимается при этом равной половине суммарного диапазона регулирования по напряжению.

Значение максимального тока короткого замыкания для внешнего КЗ рассчитываем при условиях максимального режима системы и наименьшем сопротивлении питающей сети:

$$\begin{aligned}
I_{K.BH \max}^{(3)} &= \frac{U_{BH.cп} \cdot \left( 1 + \frac{\Delta U_{ППН}}{100} \right)}{\sqrt{3} \cdot x_C + x_{T \min} + x_L} = \frac{37 \cdot \left( 1 + \frac{12}{100} \right)}{\sqrt{3} \cdot 0,913 + 23,06 + 0,4} = 3,02 \text{ кА}; \\
I_{K.HH \max}^{(3)} &= I_{K.BH \max}^{(3)} \cdot \frac{U_{BH.cп} \cdot \left( 1 + \frac{\Delta U_{ППН}}{100} \right)}{U_{HH}} = 0,98 \cdot \frac{37 \cdot \left( 1 + \frac{12}{100} \right)}{10,5} = 3,87 \text{ кА}.
\end{aligned}$$

Значение минимального тока короткого замыкания для внешнего КЗ рассчитываем при условиях минимального режима системы и наибольшего сопротивления питающей сети:

$$\begin{aligned}
I_{K.BH \min}^{(3)} &= \frac{U_{BH.cп} \cdot \left( 1 - \frac{\Delta U_{ППН}}{100} \right)}{\sqrt{3} \cdot x_C + x_{T \max} + x_L} = \frac{37 \cdot \left( 1 - \frac{12}{100} \right)}{\sqrt{3} \cdot 2,282 + 53,06 + 0,4} = 2,05 \text{ кА}; \\
I_{K.HH \min}^{(3)} &= I_{K.BH \min}^{(3)} \cdot \frac{U_{BH.cп} \cdot \left( 1 + \frac{\Delta U_{ППН}}{100} \right)}{U_{HH}} = 2,05 \cdot \frac{37 \cdot \left( 1 - \frac{12}{100} \right)}{10,5} = 2,6 \text{ кА}.
\end{aligned}$$

$$S_{T \text{ ном}} = 4 \text{ МВА}$$

Расчёт токов короткого замыкания для трансформатора ТП мощностью  $S_{ТНОМ}=4$  МВА, напряжениями  $U_{ВН}=37$  кВ и  $U_{НН}=10,5$  кВ представлен в таблице 8.1.

Таблица 8.1 – Расчётные значения токов трёхфазного короткого замыкания для трансформатора ТП

| Мощность короткого замыкания       | Значение тока трёхфазного короткого замыкания на шинах НН подстанции, приведённое к |         |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|
|                                    | 37 кВ                                                                               | 10,5 кВ |
| $S_{к\max} = 1500$ МВА             | 3020 А                                                                              | 3870 А  |
| $S_{к\text{ заданное}} = 1000$ МВА | 2940 А                                                                              | 3120 А  |
| $S_{к\min} = 600$ МВА              | 2050 А                                                                              | 2600 А  |

## 8.2 Расчетные параметры для дифференциальной токовой защиты

Для продольной дифференциальной защиты (ПДТЗ) силового трансформатора со стороны ВН устанавливаются трансформаторы тока с соединением в треугольник, а со стороны НН соединённые в звезду.

Рассчитаем параметры ПДТЗ с реле РНТ – 565 для трансформатора мощностью  $S_{ТНОМ}=4000$  ВА, напряжениями  $U_{ВН}=37$  кВ и  $U_{НН}=10,5$  кВ.

Таблица 8.2 – Параметры продольной дифференциальной токовой защиты

| Наименование                          | Формулы расчета | ВН 37 кВ    | НН 10,5 кВ |
|---------------------------------------|-----------------|-------------|------------|
| Схема соединения трансформаторов тока | -               | треугольник | звезда     |
| Коэффициент схемы соединения          | $K_{сх}$        | 1,73        | 1,0        |
| Коэффициент трансформации             | $K_1$           | 600/5       | 1500/5     |

Продолжение таблицы 8.2

| Наименование                                                                            | Формулы расчета                                                                                                                                                           | ВН 37 кВ | НН 10,5 кВ |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|------------|
| Первичный ток в плечах защиты                                                           | $I_H = \frac{S_{Т.Н}}{\sqrt{3} \cdot U_{Н.СР}}$                                                                                                                           | 62,4 А   | 220 А      |
| Вторичный ток в плечах защиты                                                           | $I_{НМ.В} = \frac{I_H \cdot K_{сх}}{K_1}$                                                                                                                                 | 0,9 А    | 0,73 А     |
| Ток небаланса первичный, без учета неточности числа витков катушки реле                 | $I'_{НБ.рас} =$<br>$= K_{ан} \cdot K_{одн} \cdot \varepsilon + \Delta U \cdot I_{К\max}$<br>$K_{ан} = 1; \quad K_{одн} = 1$<br>$\varepsilon = 0,1; \quad \Delta U = 0,12$ | 664,4 А  | 851,4 А    |
| Первичный ток срабатывания защиты из условия отстройки от максимального тока небаланса  | $I_{СЗ1} \geq K_{ОТС} \cdot I'_{НБрас}$<br>$K_{ОТС} = 1,3$                                                                                                                | 863,7 А  | 1106,8 А   |
| Первичный ток срабатывания защиты из условия отстройки от броска тока намагничивания    | $I_{СЗ2} \geq K_{ОТС} \cdot I_H$<br>$K_{ОТС} = 1,3$                                                                                                                       | 81,1 А   | 286 А      |
| Принятое значение расчетного тока для выбора уставки реле                               | $I_{СЗрас}$                                                                                                                                                               | 863,7 А  | 1106,8 А   |
| Проверка чувствительности предварительная                                               | $K_{Ч\text{ ПРЕР}} = \frac{I_{\kappa\min}^{(2)}}{I_{СЗ\text{ РАС}}}$<br>$I_{СЗ2} \geq 0,87 \cdot I_{\kappa\min}^{(3)}$                                                    | 2,06 А   | 2,04 А     |
| Расчетный ток срабатывания реле основной стороны                                        | $I_{ср\text{ осн}} = \frac{I_{СЗ\text{ рас}} \cdot k_{сх}}{k_1}$                                                                                                          | 12,45 А  |            |
| Количество витков катушки реле на основной стороне: расчётное/ принятое предварительно  | $W_{осн} = \frac{F_{ср}}{I_{ср\text{ осн}}}$<br>$F_{ср} = 100 \text{ А} \cdot \text{вит}$<br>$W_{осн} = W_{1\text{ УР}}$                                                  | 8,03/8   |            |
| Количество витков катушки реле на неосновной стороне: расчётное/принятое предварительно | $W_{1\text{ рас}} = \frac{I_{ном\text{ в осн}}}{I_{ном\text{ в 1}}} \cdot W_{осн}$<br>$W_1 = W_{11\text{ УР}}$                                                            |          | 9,86/9     |

## Продолжение таблицы 8.2

| Наименование                                                                  | Формулы расчета                                                                                                                                                 | ВН 37 кВ | НН 10,5 кВ |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|------------|
| Составляющая первичного тока небаланса от округления расчётного числа витков  | $I''_{НБ.рас} = \left( \frac{W_{1\text{ рас}} - W_1}{W_{1\text{ рас}}} \pm \frac{W_{11\text{ рас}} - W_{11}}{W_{11\text{ рас}}} \right) \cdot I_{k\text{ max}}$ | 285 А    | 730 А      |
| Расчетный первичный ток небаланса с учетом округленного значения числа витков | $I_{НБ\text{ рас}} = I'_{НБ\text{ рас}} + I''_{нб\text{ рас}}$                                                                                                  | 949 А    | 1581 А     |
| Ток срабатывания защиты                                                       | $I_{сз} = \frac{F_{ср}}{I_{ср\text{ осн}}} \cdot \frac{k_{сх}}{k_1}$                                                                                            | 1243 А   | 2134 А     |
| Коэффициент отстройки                                                         | $K_{отс} = \frac{I_{сз}}{I_{НБ\text{ рас}}}$                                                                                                                    | 1,3      | 1,35       |
| Коэффициент чувствительности защиты                                           | $K_{\eta} = \frac{I_{\kappa\text{ min}}^{(2)}}{I_{сз}}$                                                                                                         | 2,03     | 2          |
| Окончательное число витков катушки реле                                       | $W_{осн} = W_{1\text{ ур}}$ $W_{не\text{ осн}} = W_{11\text{ ур}}$                                                                                              | 8        | 9          |

### 8.3 Определение параметров максимальной токовой защиты (МТЗ)

Максимальная токовая защита (МТЗ) позволяет защитить трансформатор от КЗ внутри бака, на его выводах и при всех случаях внешних замыканий. При наличии в технологическом процессе предприятия случаев возможного одномоментного пуска большого количества электродвигателей применяется комбинация МТЗ и реле минимального напряжения. Такая защита будет срабатывать только с повышением тока до значений больших/равных току уставки при одновременном уменьшении напряжения до значений

меньших/равных напряжения уставки реле минимального напряжения, что позволяет избежать ложное срабатывание защиты.

Расчетные параметры комбинированной МТЗ для трансформатора номинальной мощности  $S_{T\text{ ном}}=4000$  ВА, напряжениями  $U_{\text{ВН}}=37$  кВ и  $U_{\text{НН}}=10,5$  кВ представлены в таблице 8.3.

Таблица 8.3 – Расчётные параметры МТЗ с пуском (блокировкой) от реле минимального напряжения

| Расчётные параметры              | Формулы расчета                                                                               | Сторона 37 кВ                          | Сторона 10,5 кВ            |                            |              |                 |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------|-----------------|
|                                  |                                                                                               | МТЗ ВН                                 | МТЗ НН                     | Защита от перегрева        | Реле обдувки | Реле блокировки |
| Схема соединения<br>коэфф. схемы |                                                                                               | $\Delta$<br>$K_{\text{сх}} = \sqrt{3}$ | $Y$<br>$K_{\text{сх}} = 1$ | $Y$<br>$K_{\text{сх}} = 1$ |              |                 |
| Коэффициент трансформации        | $n_T$                                                                                         | 600/5                                  | 1500/5                     | 1500/5                     |              |                 |
| Номинальный первичный ток        | $I_H = \frac{S_{T.H}}{\sqrt{3} \cdot U_H}$                                                    | 62,4 А                                 | 220 А                      | 220 А                      |              |                 |
| Кратность сверхтока нагрузки     | $m_{\text{CH}}$                                                                               | 1,4                                    | 2,5                        | -                          |              |                 |
| Первичный ток срабатывания       | $I_{\text{CЗ}} = \frac{K_H \cdot m_{\text{CH}}}{K_B} \cdot I_H$<br>$K_H = 1,2$<br>$K_B = 0,8$ | 131 А                                  | 825 А                      | -                          | -            | -               |
|                                  | $I_{\text{CЗ}} = \frac{K_H}{K_B} \cdot I_H$<br>$K_H = 1,05$<br>$K_B = 0,8$                    | -                                      | -                          | 289 А                      | -            | -               |
|                                  | $0,7 \cdot I_H$                                                                               | -                                      | -                          | -                          | 154 А        | -               |
|                                  | $2 \cdot I_H$                                                                                 | -                                      | -                          | -                          | -            | 440 А           |
| Расчетное значение тока уставки  | $i_{\text{ср}} = \frac{K_{\text{сх}} \cdot I_{\text{CЗ}}}{n_T}$                               | 1,9 А                                  | 0,73 А                     | 0,96 А                     | 0,51 А       | 1,47 А          |

Продолжение таблицы 8.3

| Расчётные<br>параметры                                             | Формулы<br>расчета                                                                     | Сторона<br>37 кВ | Сторона<br>10,5 кВ  |                        |                 |                    |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------|------------------------|-----------------|--------------------|
|                                                                    |                                                                                        | МТЗ ВН           | МТЗ НН              | Защита от<br>перегрева | Реле<br>обдувки | Реле<br>блокировки |
| Чувствительность<br>защиты                                         | $K_q = \frac{I_{K\min}^{(2)}}{I_{C3}} =$ $= \frac{0,87 \cdot I_{K\min}^{(3)}}{I_{C3}}$ | 2,3>1,5          | 1,11<1,5            |                        |                 |                    |
| Марка реле                                                         |                                                                                        | РТ-40/6          | РТ-40/2             | РТ-40/2                | РТ-40/2         | РТ-40/2            |
| Пределы уставки<br>реле                                            |                                                                                        | 1,5...6 А        | 0,5...2 А           | 0,5...2 А              | 0,5...2 А       | 0,5...2 А          |
| Реле минимального напряжения блокировки МТЗ                        |                                                                                        |                  |                     |                        |                 |                    |
| Коэффициент<br>трансформации                                       | $n_V$                                                                                  |                  | $\frac{10000}{100}$ |                        |                 |                    |
| Напряжение в<br>условиях<br>самозапуска                            | $U_{\min}$                                                                             |                  | 7000 В              |                        |                 |                    |
| Напряжение<br>уставки реле                                         | $V_{CP} = \frac{U_{\min}}{K_B \cdot K_H \cdot n_V}$<br>$K_H = 1,2$<br>$K_B = 1,25$     |                  | 46,7 В              |                        |                 |                    |
| Коэффициент<br>чувствительности<br>при $U_{\max} = 3000 \text{ В}$ | $k_q = \frac{U_{\min}}{K_B \cdot K_H \cdot U_{\max}}$<br>$K_H = 1,2$<br>$K_B = 1,25$   |                  | 1,56>1,5            |                        |                 |                    |
| Тип реле                                                           |                                                                                        |                  | РН-54/48            |                        |                 |                    |
| Пределы уставки                                                    |                                                                                        |                  | 12...48 В           |                        |                 |                    |

Таблица 8.4 – Расчётные параметры МТЗ на секционных выключателях

| Расчетный параметр защиты                                                                           | Формула расчета                             | Сторона 10,5 кВ |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------|
| Схема соединения трансформаторов тока                                                               |                                             | Y               |
| Коэффициент схемы соединения                                                                        |                                             | $K_{cx} = 1,0$  |
| Коэффициент трансформации                                                                           | $n_T$                                       | 1500/5          |
| Расчетный первичный ток срабатывания                                                                | $I_{C3}$                                    | 825 А           |
| Расчетный первичный ток срабатывания секционного выключателя согласованный с защитой трансформатора | $I_{C3} = K_C \cdot I_{C3}$<br>$K_C = 0,85$ | 701,3 А         |
| Расчетный ток уставки                                                                               | $i_{cp} = \frac{K_{cx} \cdot I_{C3}}{n_T}$  | 2,34 А          |
| Чувствительность защиты                                                                             | $K_q = \frac{I_{Kmin}^{(2)}}{I_{C3}}$       | 4,8 > 1,5       |
| Тип реле                                                                                            |                                             | РТ-40/6         |
| Пределы уставки                                                                                     |                                             | 1,5...6 А       |

## Заключение

В ходе выполнения бакалаврской работы рассчитаны электрические нагрузки предприятия, выбраны трансформаторы цеховых трансформаторных подстанций. Определены центры электрических нагрузок подразделений предприятия и всего предприятия в целом, принято решение по расположению ГПП. Рассмотрены условия и принято решение по выбору напряжения внешнего электроснабжения (35 кВ).

Полная расчетная нагрузка предприятия составила:  $S_{\text{рп}}=7100$  кВА. Проведен технико-экономический анализ вариантов выбора типа и мощности трансформаторов для установки на ГПП (два ТМН 4000/35/10).

Рассчитаны параметры для выбора компенсирующих устройств реактивной мощности (УК РМ), марок и сечения кабелей.

По результатам расчетов токов короткого замыкания выбрано оборудование: выключатели (ВГБ-35 и ВВУ-СЭЩ-10), разъединители марок РНДЗ, приборы учета и контроля, трансформаторы тока (ТВТ-35-10У2 и ТОЛ-СЭЩ-10), трансформаторы напряжения (ЗНОЛ-СЭЩ-10).

Спроектированная релейная защита отвечает требованиям селективности, надёжности, чувствительности.

Выбранная схема электроснабжения соответствует требованиям по надежности, выбранное оборудование экономически целесообразно.

Всё это позволяет считать цель бакалаврской работы достигнутой.

### Список используемых источников

1. Сазонова Т.В., Шлейников В.Б. Электроснабжение силовых электроприемников цеха промышленного предприятия: учебное пособие. М.: Бибком, 2016. 110 с.
2. Ополева Г. Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов : учеб. пособие. М. : ИД «ФОРУМ» : ИНФРА-М, 2018. 416 с.
3. Анчарова Т. В., Рашевская М.А., Стебунова. Е.Д. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений : учебник , 2-е изд., перераб. и доп. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2018. 415 с.
4. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю., Яшков В.А. Электроснабжение промышленных предприятий и установок: учебное пособие. М.: Форум, 2015. 368 с.
5. Хорольский В.Я., Таранов М.А., Петров Д.В. Технико-экономические расчеты распределительных электрических цепей: учебное пособие. М.: Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2015. 96 с.
6. Гальперин М.В. Электротехника и электроника : учебник, 2-е изд. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2017. 480 с.
7. Мастепаненко М.А. Введение в специальность. Электроэнергетика и электротехника : учеб. пособие. Ставрополь : СтГАУ, 2015. 116 с.
8. Алиев И.И. Электротехника и электрооборудование : учебное пособие для вузов. Саратов: Вузовское образование, 2014. 1199 с.
9. Кузнецов С.М. Проектирование тяговых и трансформаторных подстанций : учебное пособие. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2013. 92 с.
10. Кулеева Л.И., Митрофанов С.В., Семенова Л.А. Проектирование подстанции : учебное пособие. Оренбург: Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2016. 111 с.
11. 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\\_EU\\_MI\\_Z.pdf](https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/2976/1/Vahnina%20Chernenko_EU_MI_Z.pdf) (дата обращения: 09.05.2018).

12. Правила устройства электроустановок ПУЭ-6 и ПУЭ-7 (с учетом изменений по Приказу Минэнерго России от 20.12.2017 г. № 1196). М.: Норматика, 2018. 462 с.
13. Комплектное распределительное устройство высокого напряжения СЭЩ-70 на номинальные напряжения 6, 10, 20 кВ и номинальные токи от 630 до 4000 А. Техническая информация ТИ-145-2012, Версия 4.9, Самара, 2017. 77 с.
14. Методические указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА оборудования подстанций производства компании «GE Multilin». Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.120.70.109-2011. Дата введения: 13.09.2011. ОАО «ФСК ЕЭС». 2011.
15. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок и потребителей. – М.: НЦ ЭНАС, 2004. -328 с.
16. Maria Louis M. Elements of electrical engineering. - PHI Learning Pvt. Ltd., 2014. 992 p.
17. Roman K. The Digital Information Age: An Introduction to Electrical Engineering. - Cengage Learning, 2014. 400 p.
18. Surya S., Wayne Beaty H. Standard Handbook for Electrical Engineers, Seventeenth Edition. - McGraw Hill Professional, 2017. 368 p.
19. Varetsky Y. Reactive power compensation in a powerful DC drives supply system // 2016 Electric Power Networks (EPNet). Szklarska Poreba. 2016. pp. 1-6.
20. Manusov V. Z., Bumtsend U., Tretyakova E. S. Optimization compensating devices in the power supply systems using population algorithms // 2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST). Novosibirsk. 2016. pp. 276-279.