

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

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки/ специальности)

Электроснабжение

(направленность (профиль) / специализация)

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Электроснабжение группы цехов промышленного предприятия ЗАО «Народное предприятие Набережно–Челнинский картонно–бумажный комбинат им. С.П. Титова»

Обучающийся

В.В. Машин

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

В.И. Платов

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

Тольятти 2023

## Аннотация

Для функционирования промышленного предприятия ЗАО «Народное предприятие Набережно–Челнинский картонно–бумажный комбинат им. С.П. Титова» необходимо разработать проект СЭС группы цехов промышленного предприятия ЗАО «Народное предприятие Набережно–Челнинский картонно–бумажный комбинат им. С.П. Титова». Поэтому выпускная квалификационная работа (ВКР), направленная на разработку проекта СЭС группы цехов промышленного предприятия ЗАО «Народное предприятие Набережно–Челнинский картонно–бумажный комбинат им. С.П. Титова», является достаточно актуальной.

На основе проведенных расчетов в рамках ВКР осуществлен выбор современного электрооборудования системы электроснабжения группы цехов промышленного предприятия ЗАО «Народное предприятие Набережно–Челнинский картонно–бумажный комбинат им. С.П. Титова».

ВКР представляет собой пояснительную записку, состоящую из введения, девяти разделов основной части, заключения, списка используемой литературы и источников и графической части на 6 листах формата А1. Пояснительная записка выполнена на 77 листах формата А4, содержит 14 таблиц и 6 рисунков.

## Содержание

|  |    |
|--|----|
| Введение.....  | 4  |
| 1 Анализ объекта проектирования .....  | 6  |
| 2 Расчет электрических нагрузок .....  | 8  |
| 2.1 Расчет нагрузок по ремонтно–механическому цеху.....                              | 8  |
| 2.2 Расчет электрических нагрузок по предприятию.....                                | 18 |
| 3 Выбор числа и мощности трансформаторов ГПП.....                                    | 23 |
| 4 Картограмма нагрузок и определение центра электрических нагрузок.....              | 26 |
| 5 Определение типа, количество и мощности КТП с учетом компенсирующих устройств..... | 30 |
| 6 Выбор сечения питающей линии и распределительных сетей .....                       | 36 |
| 7 Внешнее электроснабжение предприятия .....   | 42 |
| 7.1 Определение потерь электроэнергии в силовых трансформаторах ГПП.....             | 42 |
| 7.2 Расчет ЛЭП от подстанции энергосистемы до ГПП предприятия .....                  | 44 |
| 7.3 Расчет токов КЗ в сети ВН.....   | 45 |
| 7.4 Выбор коммутационной и измерительной аппаратуры .....                            | 47 |
| 8 Расчет токов короткого замыкания .....   | 54 |
| 9 Выбор аппаратов и токоведущих частей .....   | 64 |
| 9.1 Выбор ячеек КРУ ГПП.....   | 64 |
| 9.2 Выбор выключателей КРУ .....   | 65 |
| 9.3 Выбор трансформаторов тока в ячейках КРУ .....                                   | 66 |
| 9.4 Выбор трансформаторов напряжения .....   | 68 |
| 9.5 Проверка кабелей напряжением 10 кВ на термическую стойкость к ТКЗ69              |    |
| 9.6 Выбор трансформаторов собственных нужд.....                                      | 71 |
| Заключение .....   | 73 |
| Список используемой литературы и используемых источников.....                        | 75 |

## Введение

В современном промышленном производстве электроснабжение является одним из важнейших факторов, обеспечивающих бесперебойную работу оборудования и производственных процессов. От надежности и качества электроснабжения зависит не только эффективность работы предприятия, но и безопасность персонала, а также защита оборудования от повреждений.

Актуальность темы работы обусловлена необходимостью повышения эффективности электроснабжения промышленных предприятий, улучшения качества электрической энергии и снижения затрат на электроэнергию. В результате проведенного анализа и разработки рекомендаций, предприятие сможет обеспечить более стабильную и надежную работу своих производственных процессов, что приведет к повышению его конкурентоспособности на рынке.

Объектом исследования является группа цехов промышленного предприятия ЗАО «Народное предприятие Набережно–Челнинский картонно–бумажный комбинат им. С.П. Титова».

Предметом исследования является система электроснабжения группы цехов промышленного предприятия ЗАО «Народное предприятие Набережно–Челнинский картонно–бумажный комбинат им. С.П. Титова».

Целью выпускной квалификационной работы является изучение вопросов электроснабжения группы цехов промышленного предприятия ЗАО «Народное предприятие Набережно–Челнинский картонно–бумажный комбинат им. С.П. Титова», анализ текущего состояния системы электроснабжения и разработка рекомендаций по ее улучшению.

На основании поставленной цели необходимо выделить следующие задачи:

- провести анализ объекта проектирования;
- выполнить расчет электрических нагрузок;

- выбрать силовые трансформаторы ГПП;
- разработать картограмму нагрузок и определить центр электрических нагрузок;
- определить тип, количество и мощность КТП с учетом компенсирующих устройств;
- выбрать сечения питающей линии и распределительных сетей;
- выбрать систему внешнего электроснабжения;
- выбрать аппараты и токоведущие части.

Практическая значимость ВКР заключается в том, что электроснабжение является одним из важнейших элементов функционирования любого промышленного предприятия. От качества и надежности электроснабжения зависят работоспособность и эффективность производственных процессов, а также безопасность персонала и оборудования. В данной ВКР рассматривается вопрос об электроснабжении группы цехов промышленного предприятия ЗАО «Народное предприятие Набережно–Челнинский картонно–бумажный комбинат им. С.П. Титова», что является актуальной и практически значимой проблемой в современных условиях. Работа содержит рекомендации и предложения по улучшению электроснабжения, которые могут быть использованы при проектировании и эксплуатации электрических систем на промышленных предприятиях.

## 1 Анализ объекта проектирования

На рассматриваемом промышленном предприятии имеется низковольтная и высоковольтная нагрузка. Высоковольтные электроприемниками на предприятии являются две печи типа РКЗ, мощность каждой из которых составляет 2500 кВт, пять синхронных двигателей СД, мощность каждой из которых составляет 800 кВт, 4 ЭПТМ, мощность каждой из которых составляет 1250 кВт, пять асинхронных двигателя, мощность каждой из которых составляет 250 кВт.

«Категория основных потребителей по надёжности электроснабжения – II. Расстояние от предприятия до питающей подстанции 12 км. Число часов использования максимума нагрузки 4355 ч/год» [2].

Рассматриваемая группа цехов промышленного предприятия ЗАО «Народное предприятие Набережно–Челнинский картонно–бумажный комбинат им. С.П. Титова» проектируется в г. Набережные Челны Республики Татарстан.

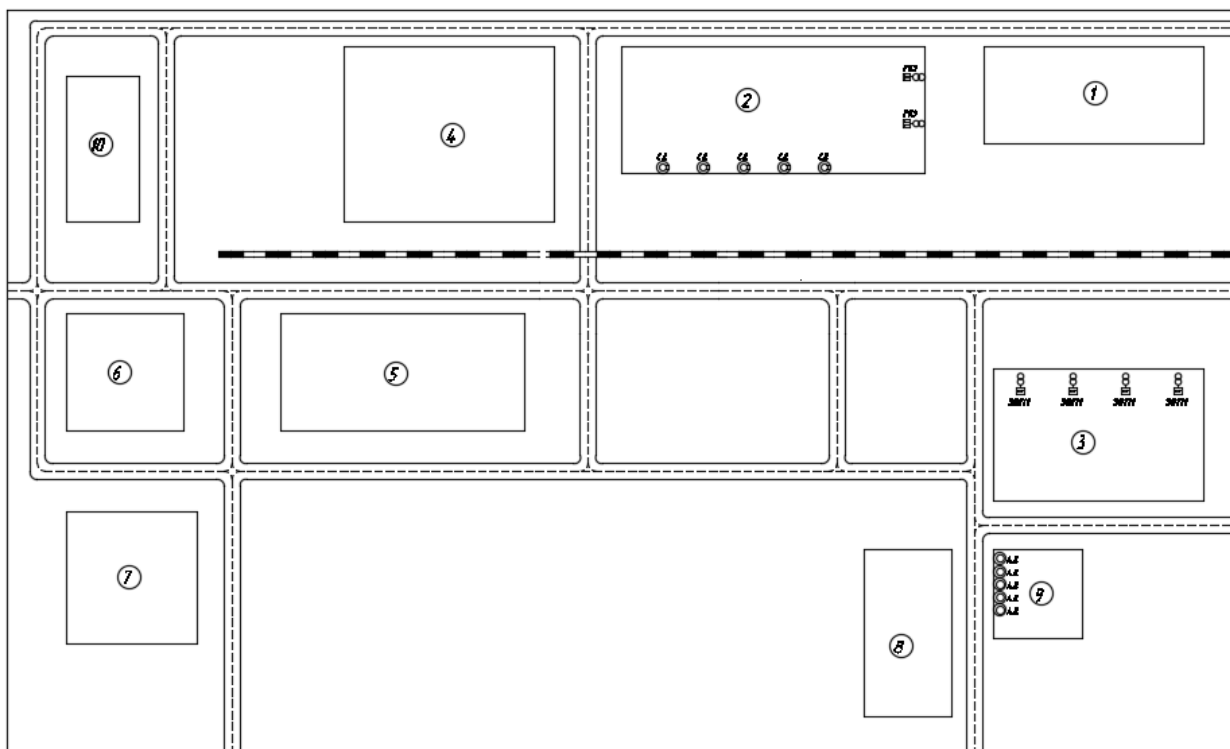
На рисунке 1 обозначены цеха, наименования, технические характеристики низковольтной нагрузки и категории по надёжности электроснабжения которых сведены в таблицу 1.

Таблица 1– Технические характеристики электрооборудования цехов предприятия

| № на плане | Наименование цехов и узлов СЭС                 | Категория по надёжности | пэ  | Р <sub>Σ</sub> , кВт | К <sub>ИА</sub> | cosφ |
|------------|--|-------------------------|-----|----------------------|-----------------|------|
| 1          | 2  | 3                       | 4   | 5                    | 6               | 7    |
| 1          | Цех технической подготовки производства (ЦТП)  | 2                       | 80  | 4000                 | 0,72            | 0,75 |
| 2          | Картоно–делательная машина (КДМ)               | 2                       | 50  | 5000                 | 0,60            | 0,70 |
| 3          | Отделение роспуска картонной фабрики (РПО КДМ) | 2                       | 125 | 7500                 | 0,60            | 0,52 |
| 4          | Фабрика гофротары (ФГТ)                        | 2                       | 83  | 6600                 | 0,55            | 0,70 |
| 5          | Склад готовой продукции                        | 3                       | 30  | 150                  | 0,30            | 0,65 |
| 6          | Ремонтно–механический цех                      | 2                       | 85  | 1786                 | 0,32            | 0,72 |

Продолжение таблицы 1

| 1  | 2  | 3 | 4  | 5     | 6    | 7    |
|----|--|---|----|-------|------|------|
| 7  | Отделение роспуска бумажной фабрики (РПО БФ) | 2 | 65 | 1495  | 0,75 | 0,70 |
| 8  | Бумажная фабрика                             | 2 | 90 | 6400  | 0,50 | 0,70 |
| 9  | Котельная                                    | 2 | 50 | 500   | 0,60 | 0,70 |
| 10 | Заводоуправление                             | 2 | 18 | 250   | 0,45 | 0,70 |
| –  | Итого  | – | –  | 33681 | –    | –    |



СД – синхронный двигатель; АД – асинхронные двигатели; РКЗ – рудно–термическая печь оснащенная круглой ванной, агрегат закрыт сводом; ЭПТМ – электрическая печь с трансформаторами

Рисунок 1 – План рассматриваемой группы цехов промышленного предприятия ЗАО «Народное предприятие Набережно–Челнинский картонно–бумажный комбинат им. С.П. Титова»

Выводы по разделу.

В первом разделе ВКР проведен анализ объекта проектирования. Приведены характеристики группы цехов промышленного предприятия ЗАО «Народное предприятие Набережно–Челнинский картонно–бумажный комбинат им. С.П. Титова», а также план данного предприятия.

## 2 Расчет электрических нагрузок

### 2.1 Расчет нагрузок по ремонтно–механическому цеху

Расчет нагрузок по цеху является важной частью проектирования электроснабжения промышленных предприятий. В процессе производства используется множество электрических приборов и оборудования, а также существует необходимость в освещении, кондиционировании воздуха, насосных установках и т.д. Все эти потребители требуют определенной мощности, которую необходимо учитывать при проектировании системы электроснабжения.

«Рассмотрим подробно заготовительное отделение. В данном отделении находится 73 электроприемника общей номинальной мощностью 556,7 кВт. Для их питания в отделении устанавливается 1 распределительный шинопровод ШР–1» [1].

«Значения коэффициента использования по активной мощности  $k_{иа}$  и коэффициента мощности  $\cos\varphi$  для каждой из групп электроприемников определяется по справочнику. По известному значению  $\cos\varphi$ , определяется  $\operatorname{tg}\varphi$ » [1].

«Далее для каждой группы однотипных электроприемников определяются средние мощности» [19]:

$$P_{\text{ср}} = k_{иа} \cdot n \cdot p, \quad (1)$$

$$Q_{\text{ср}} = k_{иа} \cdot n \cdot p_{\text{ном}} \cdot \operatorname{tg}\varphi, \quad (2)$$

где  $n$  – «число электроприемников» [19];

$p_{\text{ном}}$  – «номинальная мощность электроприемника, кВт» [19].

«В качестве примера приводится расчет для группы электроприемников в составе 2 ножниц гильотинных, получающих питание от ШР–1» [19]:



$$P_{cp} = 0,12 \cdot 4 \cdot 7 = 3,4 \text{ кВт},$$

$$Q_{cp} = 0,12 \cdot 4 \cdot 7 \cdot 1,73 = 5,8 \text{ квар}.$$

«Эффективное число электроприемников определяется как» [19]:

$$n_э = \frac{\left( \sum_{i=1}^n p_{номі} \right)^2}{\sum_{i=1}^n p_{номі}^2}, \quad (3)$$

где  $p_{номі}$  – «номинальная активная мощность  $i$ -го электроприемника, кВт» [19].

$$n_э = \frac{556,7^2}{7047} = 44.$$

«Далее определяется средневзвешенный коэффициент использования по формуле» [19]:

$$K_{иа} = \frac{\sum_{i=1}^n k_{иаі} \cdot p_{номі}}{\sum_{i=1}^n p_{номі}}, \quad (4)$$

где  $k_{иаі}$  – «коэффициент использования  $i$ -го потребителя электроэнергии» [19].

$$K_{иа} = \frac{131,4}{556,7} = 0,24.$$

«Средневзвешенное значение  $\text{tg}\phi$  определяется по выражению» [19]:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\sum_{i=1}^n k_{\text{иаи}} \cdot p_{\text{номи}} \cdot \operatorname{tg}\varphi_i}{\sum_{i=1}^n k_{\text{иаи}} \cdot p_{\text{номи}}}, \quad (5)$$

где  $\operatorname{tg}\varphi_i$  – «коэффициент реактивной мощности  $i$ -го потребителя электроэнергии» [19]

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{175,0}{131,4} = 1,33.$$

«По полученному значению  $\operatorname{tg}\varphi$  находится значение  $\cos\varphi$ » [19].

«Расчетную активную и реактивную мощности для энергосистемы второго уровня можно определить по формуле» [19]:

$$P_p = K_{\text{ра}} \cdot \sum_{i=1}^n k_{\text{иаи}} \cdot p_{\text{номи}}, \quad (6)$$

$$Q_p = K_{\text{рр}} \cdot \sum_{i=1}^n k_{\text{иаи}} \cdot p_{\text{номи}} \cdot \operatorname{tg}\varphi_i, \quad (7)$$

где  $K_{\text{ра}}$  – «расчетный коэффициент по активной мощности, определяется учитывая эффективное число ЭП и коэффициент использования по активной мощности,  $K_{\text{ра}} = f(n_э, k_{\text{иа}})$ » [19];

$K_{\text{рр}}$  – «расчетный коэффициент реактивной мощности» [19].

«Значение коэффициента расчетной нагрузки по реактивной мощности определяется по формуле» [19]:

$$K_{\text{рр}} = 1 + \frac{1}{6 \cdot \sqrt{n_э}}. \quad (8)$$

«Для рассматриваемого отделения расчетные мощности» [19] составят:

$$P_p = 1,00 \cdot 131,4 = 131,4 \text{ кВт},$$

$$K_{pp} = 1 + \frac{1}{6 \cdot \sqrt{44}} = 1,03,$$

$$Q_p = 1,03 \cdot 131,4 \cdot 1,33 = 179,4 \text{ квар}.$$

«Полную расчетную нагрузку группы трехфазных» [19] потребителей электроэнергии можно определить по выражению

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}, \quad (9)$$

$$S_p = \sqrt{131,4^2 + 179,4^2} = 222,4 \text{ кВА}.$$

«Расчетный ток» [19]:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}, \quad (10)$$

где  $U_{ном}$  – «номинальное напряжение сети, В» [19].

$$I_p = \frac{222,4}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 337,8 \text{ А}.$$

Далее необходимо «определить пиковую нагрузку по отделению» [19].

Пусковой ток - это ток, который потребляет электрический двигатель в момент запуска. Он может быть гораздо выше номинального тока, который потребляет двигатель при работе в нормальном режиме. Пусковой ток зависит от многих факторов, таких как мощность двигателя, его конструкция, характеристики питающей сети и другие параметры. «Пусковой ток электроприемника с наибольшим пусковым током – мостового крана» [19]:

$$I_{\text{пуск}} = \frac{K_{\text{пуск}} \cdot P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \eta \cdot \cos\varphi}, \quad (11)$$

$$I_{\text{пуск}} = \frac{5 \cdot 27}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,9 \cdot 0,5} = 455,8 \text{ А.}$$

«Пиковый ток по отделению» [19]:

$$I_{\text{пик}} = I_{\text{пуск}} + I'_p, \quad (12)$$

где  $I'_p$  – «расчетный ток без учета запускаемого приемника, А» [19].

$$I_{\text{пик}} = 455,8 + 308,8 = 764,6 \text{ А.}$$

«При расчете нагрузок по цеху в целом также необходимо определить эффективное число электроприемников, средневзвешенные коэффициенты использования и  $\text{tg}\varphi$ » [1]:

$$n_{\text{э}} = \frac{1786,0^2}{37611} = 85,$$

$$K_{\text{иа}} = \frac{579,3}{1786,0} = 0,32,$$

$$\text{tg}\varphi = \frac{564,2}{579,3} = 0,97$$

«Расчетные активная и реактивная мощности цеха» [19]:

$$P_{\text{р.ц}} = K_{\text{ра}} \cdot \sum_{i=1}^n K_{\text{иа}i} \cdot P_{\text{ном}i}, \quad (13)$$

$$Q_{\text{р.ц}} = K_{\text{ра}} \cdot \sum_{i=1}^n K_{\text{иа}i} \cdot P_{\text{ном}i} \cdot \text{tg}\varphi_i, \quad (14)$$

где  $K_{pa}$  – «коэффициент расчетной нагрузки по активной мощности» [19].

$$P_{p.ц} = 0,70 \cdot 579,3 = 405,5 \text{ кВт},$$

$$Q_{p.ц} = 0,70 \cdot 564,2 = 394,9 \text{ квар.}$$

Для того, чтобы получить полную расчетную мощность цеха, следует учесть нагрузку освещения. Освещение цеха является важным аспектом обеспечения безопасности и комфорта работников, а также эффективности производственных процессов.

Освещение цеха является важным элементом проектирования промышленных объектов, так как оно влияет на безопасность, производительность и комфорт работников. Целью освещения цеха является обеспечение достаточной освещенности рабочей зоны, равномерного распределения света и минимизации бликов и ослепления.

При проектировании освещения цеха необходимо учитывать ряд факторов. Один из ключевых факторов - это вид выполняемых работ в цехе. Различные операции требуют различного уровня освещенности.

Размер и форма цеха также играют важную роль при проектировании освещения. Геометрия помещения также влияет на распределение света. Неравномерное распределение света может создавать тени и неравномерность освещения, что может затруднять выполнение работ.

Расстановка светильников в цехе имеет большое значение для достижения равномерного освещения и предотвращения возможных бликов и ослепления. Расстояние между светильниками должно быть оптимальным, чтобы обеспечить равномерное покрытие светом всего цеха.

«Расчетную нагрузку осветительных установок необходимо определять по удельной мощности освещения на единицу производственной поверхности пола, учитывая коэффициент спроса» [19]:

$$P_{p.осв} = k_{с.осв} \cdot P_{у.осв} \cdot F_{ц}, \quad (15)$$

где  $k_{с.осв}$  – «коэффициент спроса по активной мощности электроосвещения» [19];

$P_{у.осв}$  – «удельная мощность освещения на 1 м<sup>2</sup> производственной поверхности пола цеха, Вт/м<sup>2</sup>» [19];

$F_{ц}$  – «площадь поверхности пола цеха, м<sup>2</sup>» [19].

«Расчетную реактивную мощность осветительной нагрузки можно определить по формуле» [19]:

$$Q_{p.осв} = P_{p.осв} \cdot \operatorname{tg}\varphi_{осв}, \quad (16)$$

где  $\operatorname{tg}\varphi_{осв}$  – коэффициент реактивной мощности электроосвещения.

Для исследуемого цеха

$$P_{p.осв} = 0,9 \cdot 0,015 \cdot 5820 = 78,6 \text{ кВт};$$

$$Q_{p.осв} = 78,6 \cdot 0,33 = 23,6 \text{ квар.}$$

«Полную расчетную низковольтную нагрузку цеха можно определить по формуле» [19]:

$$S_{p.ц} = \sqrt{(P_{p.ц} + P_{p.осв})^2 + (Q_{p.ц} + Q_{p.осв})^2}, \quad (17)$$

$$S_{p.ц} = \sqrt{(405,5 + 78,6)^2 + (394,9 + 23,6)^2} = 639,9 \text{ кВА.}$$

«На этом расчет электрических нагрузок по ремонтно–механическому цеху заканчивается, все результаты расчета приведены в таблице 2» [19].

Таблица 2–Расчет нагрузок по отделениям ремонтно–механического цеха

| Наименование узлов СЭС и электроприемников   | n  | P <sub>НОМ</sub> , кВт | P <sub>СУМ</sub> , кВт | K <sub>ИА</sub> | cosφ | tgφ  | P <sub>с</sub> , кВт | Q <sub>с</sub> , кВт | n•P <sub>НОМ</sub> <sup>2</sup> | nЭ | K <sub>РА</sub> | K <sub>РР</sub>  | P <sub>Р</sub> , кВт | Q <sub>Р</sub> , квар | S <sub>Р</sub> , кВА | I <sub>Р</sub> , А |
|--|----|------------------------|------------------------|-----------------|------|------|----------------------|----------------------|---------------------------------|----|-----------------|--|----------------------|-----------------------|----------------------|--------------------|
| 1  | 2  | 3                      | 4                      | 5               | 6    | 7    | 8                    | 9                    | 10                              | 11 | 12              | 13   | 14                   | 15                    | 16                   | 17                 |
| Заготовительное отделение (ШР–1)   |    |                        |                        |                 |      |      |                      |                      |                                 |    |                 |  |                      |                       |                      |                    |
| 1. Ножницы гильотинные   | 4  | 7                      | 28                     | 0,12            | 0,50 | 1,73 | 3,4                  | 5,8                  | 196                             | –  | –               | –  | –                    | –                     | –                    | –                  |
| 2. Ножницы листовые  | 5  | 14                     | 70                     | 0,14            | 0,45 | 1,98 | 9,8                  | 19,4                 | 980                             | –  | –               | –  | –                    | –                     | –                    | –                  |
| 3. Вальцы гибочные   | 6  | 5                      | 30                     | 0,13            | 0,50 | 1,73 | 3,9                  | 6,8                  | 150                             | –  | –               | $I_{\text{пуск}} = (K_{\text{пуск}} \cdot P_{\text{ном}}) / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \eta_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi_{\text{ном}}) = (5 \cdot 27) / (\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,9 \cdot 0,5) = 455,8 \text{ А}$ | –                    | –                     | –                    | –                  |
| 4. Пресс ножницы   | 9  | 2,2                    | 19,8                   | 0,12            | 0,45 | 1,98 | 2,4                  | 4,7                  | 44                              | –  | –               |  |                      |                       |                      |                    |
| 5. Пила дисковая   | 7  | 5,8                    | 40,6                   | 0,14            | 0,50 | 1,73 | 5,7                  | 9,8                  | 235                             | –  | –               |  |                      |                       |                      |                    |
| 6. Пресс кривошипный   | 3  | 4,5                    | 13,5                   | 0,20            | 0,65 | 1,17 | 2,7                  | 3,2                  | 61                              | –  | –               |  |                      |                       |                      |                    |
| 7. Пресс двухкривошипный   | 3  | 14                     | 42                     | 0,18            | 0,65 | 1,17 | 7,6                  | 8,8                  | 588                             | –  | –               |  |                      |                       |                      |                    |
| 8. Пресс кривошипный   | 4  | 20                     | 80                     | 0,19            | 0,65 | 1,17 | 15,2                 | 17,8                 | 1600                            | –  | –               |  |                      |                       |                      |                    |
| 9. Пресс фрикционный   | 6  | 10                     | 60                     | 0,20            | 0,65 | 1,17 | 12,0                 | 14,0                 | 600                             | –  | –               |  |                      |                       |                      |                    |
| 10. Машина для кислородной резки   | 3  | 0,6                    | 1,8                    | 0,20            | 0,65 | 1,17 | 0,4                  | 0,4                  | 1                               | –  | –               | –  | –                    | –                     | –                    |                    |
| 11. Радиально–сверлильный станок   | 8  | 4,5                    | 36                     | 0,14            | 0,50 | 1,73 | 5,0                  | 8,7                  | 162                             | –  | –               | –  | –                    | –                     | –                    | –                  |
| 12. Вентилятор   | 12 | 4,5                    | 54                     | 0,65            | 0,80 | 0,75 | 35,1                 | 26,3                 | 243                             | –  | –               | –  | –                    | –                     | –                    | –                  |
| 13. Мостовой кран  | 3  | 27                     | 81                     | 0,35            | 0,50 | 1,73 | 28,4                 | 49,1                 | 2187                            | –  | –               | –  | –                    | –                     | –                    | –                  |
| Итого силовой нагрузки по ШР–1   | 73 | 0,69–27                | 556,7                  | 0,24            | 0,60 | 1,33 | 131,4                | 175,0                | 7047                            | 44 | 1,00            | 1,03   | 131,4                | 179,4                 | 222,4                | 337,8              |
| Расчет пикового тока отделения   | –  | –                      | –                      | –               | –    | –    | –                    | –                    | –                               | –  | –               | –  | –                    | –                     | –                    | –                  |
| ЭП с наибольшим пусковым током кран мостовой p <sub>ном</sub> = 27 кВт; K <sub>пуск</sub> = 5; η = 0,9; cos φ = 0,50 | –  | –                      | –                      | –               | –    | –    | –                    | –                    | –                               | –  | –               | –  | –                    | –                     | –                    | –                  |
| Расчетная нагрузка без мост. крана   | 72 | 0,69–27                | 529,7                  | 0,23            | 0,61 | 1,30 | 122,0                | 158,6                | 6318                            | 44 | 1,00            | 1,03   | 122,0                | 162,6                 | 203,2                | 308,8              |
| Сборочно–сварочное отделение (ШР–2)  |    |                        |                        |                 |      |      |                      |                      |                                 |    |                 |  |                      |                       |                      |                    |
| 14,15,17,18. Однофазная нагрузка   | 24 | 3,65–35                | 240,3                  | 0,29            | 0,57 | 1,43 | 68,7                 | 98,7                 | 4766                            | –  | –               | –  | –                    | –                     | –                    | –                  |
| 16. Шланговый полуавтомат  | 6  | 5,2                    | 31,2                   | 0,14            | 0,50 | 1,73 | 4,4                  | 7,6                  | 162                             | –  | –               | –  | –                    | –                     | –                    | –                  |

Продолжение таблицы 2

| 1                                   | 2  | 3      | 4     | 5    | 6    | 7    | 8     | 9     | 10    | 11 | 12   | 13   | 14    | 15    | 16    | 17    |
|-------------------------------------|----|--------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|----|------|--|-------|-------|-------|-------|
| 19. Радиально–сверлильный станок    | 4  | 4,5    | 18    | 0,14 | 0,50 | 1,73 | 2,5   | 4,4   | 81    | –  | –    | –  | –     | –     | –     | –     |
| 20. То же                           | 7  | 2,2    | 15,4  | 0,12 | 0,45 | 1,98 | 1,8   | 3,7   | 34    | –  | –    | –  | –     | –     | –     | –     |
| 21. Обдирочно–шлифовальный станок   | 7  | 2,2    | 15,4  | 0,14 | 0,50 | 1,73 | 2,2   | 3,7   | 34    | –  | –    | $I_{\text{пуск}} = (K_{\text{пуск}} \cdot P_{\text{ном}}) /$ $/(\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \eta_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi_{\text{ном}}) =$ $= (5 \cdot 10) / (\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,9 \cdot 0,65) =$ $= 129,9 \text{ A}$ |       |       |       |       |
| 22. Пресс гидравлический            | 2  | 6      | 12    | 0,20 | 0,65 | 1,17 | 2,4   | 2,8   | 72    | –  | –    |  |       |       |       |       |
| 23. То же                           | 2  | 10     | 20    | 0,18 | 0,65 | 1,17 | 3,6   | 4,2   | 200   | –  | –    |  |       |       |       |       |
| 24. Дыропробивной станок            | 4  | 4,5    | 18    | 0,14 | 0,45 | 1,98 | 2,5   | 5,0   | 81    | –  | –    |  |       |       |       |       |
| 25. Вентилятор                      | 7  | 4,5    | 31,5  | 0,80 | 0,80 | 0,75 | 25,2  | 18,9  | 142   | –  | –    |  |       |       |       |       |
| 26. Мостовой кран                   | 3  | 6,1    | 18,3  | 0,35 | 0,50 | 1,73 | 6,4   | 11,1  | 112   | –  | –    |  |       |       |       |       |
| Итого силовой нагрузки по ШР–2      | 66 | 2,2–35 | 420,1 | 0,29 | 0,60 | 1,34 | 119,7 | 160,1 | 5683  | 31 | 1,00 | 1,03   | 119,7 | 164,9 | 203,8 | 309,6 |
| Расчет пикового тока отделения      | –  | –      | –     | –    | –    | –    | –     | –     | –     | –  | –    | –  | –     | –     | –     | –     |
| ЭП с наибольшим пусковым током      | –  | –      | –     | –    | –    | –    | –     | –     | –     | –  | –    | –  | –     | –     | –     | –     |
| Расчетная нагрузка без прессы гидр. | 65 | 2,2–35 | 410,1 | 0,29 | 0,60 | 1,34 | 117,9 | 158,0 | 5583  | 30 | 1,00 | 1,03   | 117,9 | 162,8 | 201,0 | 305,4 |
| Кузнечно–котельное отделение (ШР–3) |    |        |       |      |      |      |       |       |       |    |      |  |       |       |       |       |
| 27. Пресс фрикционный               | 8  | 3,2    | 25,6  | 0,20 | 0,65 | 1,17 | 5,1   | 6,0   | 82    | –  | –    | –  | –     | –     | –     | –     |
| 28. Молот пневматический            | 3  | 26,5   | 79,5  | 0,24 | 0,65 | 1,17 | 19,1  | 22,3  | 2107  | –  | –    | –  | –     | –     | –     | –     |
| 29. Эксцетриковый пресс             | 3  | 4,5    | 13,5  | 0,18 | 0,65 | 1,17 | 2,4   | 2,8   | 61    | –  | –    | –  | –     | –     | –     | –     |
| 30. Вентилятор дутьевой             | 7  | 2,2    | 15,4  | 0,65 | 0,80 | 0,75 | 10,0  | 7,5   | 34    | –  | –    | $I_{\text{пуск}} = (K_{\text{пуск}} \cdot P_{\text{ном}}) /$ $/(\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \eta_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi_{\text{ном}}) =$ $= (5 \cdot 36) / (\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,9 \cdot 0,5) =$ $= 607,7 \text{ A}$  |       |       |       |       |
| 31. Точило обдирочное               | 6  | 3,2    | 19,2  | 0,12 | 0,45 | 1,98 | 2,3   | 4,6   | 61    | –  | –    |  |       |       |       |       |
| 32. Сварочный трансформатор         | 5  | 33     | 165   | 0,25 | 0,45 | 1,98 | 41,3  | 81,9  | 5445  | –  | –    |  |       |       |       |       |
| 33. Электронагреватель заклепок     | 5  | 10     | 50    | 0,60 | 1,00 | 0,00 | 30,0  | 0,0   | 500   | –  | –    |  |       |       |       |       |
| 34. Электропечь камерная            | 6  | 45     | 270   | 0,60 | 0,95 | 0,33 | 162,0 | 53,2  | 12150 | –  | –    |  |       |       |       |       |
| 35. Электропечь высокого отпуска    | 3  | 24     | 72    | 0,80 | 0,95 | 0,33 | 57,6  | 18,9  | 1728  | –  | –    | –  | –     | –     | –     | –     |
| 36. Мостовой кран                   | 2  | 36     | 72    | 0,15 | 0,50 | 1,73 | 10,8  | 18,7  | 2592  | –  | –    | –  | –     | –     | –     | –     |
| 37. Вентилятор                      | 6  | 4,5    | 27    | 0,65 | 0,80 | 0,75 | 17,6  | 13,2  | 122   | –  | –    | –  | –     | –     | –     | –     |
| Итого силовой нагрузки по ШР–3      | 54 | 2,2–45 | 809,2 | 0,41 | 0,82 | 0,70 | 328,1 | 229,1 | 24881 | 26 | 1,00 | 1,03   | 328,1 | 236,6 | 404,5 | 614,6 |



Окончание таблицы 2

| 1  | 2   | 3       | 4      | 5    | 6    | 7    | 8     | 9     | 10    | 11 | 12   | 13   | 14    | 15    | 16    | 17    |
|--|---|---------|--------|------|------|------|-------|-------|-------|----|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Расчет пикового тока отделения               | –   | –       | –      | –    | –    | –    | –     | –     | –     | –  | –    | –    | –     | –     | –     | –     |
| ЭП с наибольшим пусковым током мостовой кран | –   | –       | –      | –    | –    | –    | –     | –     | –     | –  | –    | –    | –     | –     | –     | –     |
| Расчетная нагрузка без мостового крана       | 53  | 2,2–45  | 773,2  | 0,42 | 0,83 | 0,68 | 322,7 | 219,8 | 23585 | 25 | 1,00 | 1,03 | 322,7 | 227,0 | 394,6 | 599,5 |
| <u>Ремонтно–механический цех</u>             | –   | –       | –      | –    | –    | –    | –     | –     | –     | –  | –    | –    | –     | –     | –     | –     |
| 1 Заготовительное отделение (ШР–1)           | 73  | 0,69–27 | 556,7  | 0,24 | 0,60 | 1,33 | 131,4 | 175,0 | 7047  | –  | –    | –    | –     | –     | –     | –     |
| 2 Сборочно–сварочное отделение (ШР–2)        | 66  | 2,2–35  | 420,1  | 0,29 | 0,60 | 1,34 | 119,7 | 160,1 | 5683  | –  | –    | –    | –     | –     | –     | –     |
| 3 Кузнечно–котельное отделение (ШР–3)        | 54  | 2,2–45  | 809,2  | 0,41 | 0,82 | 0,70 | 328,1 | 229,1 | 24881 | –  | –    | –    | –     | –     | –     | –     |
| Всего силовой нагрузки по цеху               | 193   | 0,69–45 | 1786,0 | 0,32 | 0,72 | 0,97 | 579,3 | 564,2 | 37611 | 85 | 0,70 | 0,70 | 405,5 | 394,9 | 566,0 | 860,0 |
| Освещение                                    | –   | –       | 87,3   | 0,90 | 0,95 | 0,30 | –     | –     | –     | –  | –    | –    | 78,6  | 23,6  | 82,0  | –     |
| Итого с учетом освещения                     | 193   | 0,69–45 | 1873,3 | 0,32 | 0,72 | 0,97 | 579,3 | 564,2 | 37611 | 85 | –    | –    | 484,1 | 418,5 | 639,9 | 972,2 |
| Расчет пикового тока для цеха                | –   | –       | –      | –    | –    | –    | –     | –     | –     | –  | –    | –    | –     | –     | –     | –     |
| ЭП с наибольшим пусковым током мостовой кран | $I_{\text{пуск}} = (K_{\text{пуск}} \cdot P_{\text{ном}}) / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \eta_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}) = (5 \cdot 36) / (\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,9 \cdot 0,5) = 607,7 \text{ А}$ |         |        |      |      |      |       |       |       |    |      |      |       |       |       |       |
| Расчетная нагрузка без мостового крана       | 192   | 0,69–45 | 1750   | 0,33 | 0,72 | 0,97 | 573,9 | 554,8 | 35811 | 86 | 0,70 | 0,70 | 480,3 | 411,9 | 632,8 | 961,4 |

В данном подразделе были проведены расчёты нагрузок по ремонтно-механическому цеху, которые будут необходимы для дальнейшего выполнения работы.

## 2.2 Расчет электрических нагрузок по предприятию

Расчет электрических нагрузок является важной составляющей в проектировании и эксплуатации электрических систем. Он позволяет определить необходимую мощность и количество оборудования для обеспечения электроснабжения объекта, а также произвести расчет электропотребления для оценки эффективности использования электроэнергии и выявления возможных экономических проблем.

В целом, правильный расчет электрических нагрузок позволяет обеспечить эффективное и безопасное использование электроэнергии на объекте, а также оптимизировать затраты на электроснабжение и поддержание электрических систем в рабочем состоянии.

«Особенностью расчета электрических нагрузок на III уровне и выше коэффициент расчетной нагрузки по реактивной мощности принимается равным коэффициенту расчетной нагрузки по активной мощности  $K_{pp}=K_{pa}$ . Значения коэффициентов расчетной нагрузки находятся из» [19]. Следует отметить, что при

$$k_{ia_i} \cdot p_{ном_i} \leq 100 \text{ кВт},$$

«значения коэффициентов расчётной нагрузки целесообразно определять так же, как и для второго уровня. Это объясняется тем, что сечения проводников, питающих такие узлы, будут иметь значения не превышающие 50–70 мм<sup>2</sup>, а следовательно, и незначительные постоянные времени нагрева» [19].

«При определении расчетной нагрузки высоковольтных электроприемников необходимо учитывать, что коэффициент расчетной

нагрузки  $K_{pa}=1$ , тогда расчетные активная и реактивная мощности будут равны соответственно средним активной и реактивной мощностям» [19].

«Результаты расчёта электрических нагрузок по предприятию представлены в таблице 3» [19]

Во втором разделе ВКР будут рассчитаны электрические нагрузки ремонтно–механического цеха и всего предприятия ЗАО «Народное предприятие Набережно–Челнинский картонно–бумажный комбинат им. С.П. Титова» в целом. В результате проведенного расчета электрических нагрузок группы цехов промышленного предприятия ЗАО «Народное предприятие Набережно–Челнинский картонно–бумажный комбинат им. С.П. Титова» определены суммарные активные и реактивные мощности, а также пиковые и среднесуточные значения тока на основных потребителях.

Таблица 3– Расчет нагрузок по предприятию

| Наименование цехов и узлов СЭС                 | $P_{ном}, \text{кВт}$ | $nЭ$ | $P_{\Sigma}, \text{кВт}$ | $K_{ИА}$ | $\cos\varphi$ | $\text{tg}\varphi$ | $P_C, \text{кВт}$ | $Q_C, \text{квар}$ | $K_{РА}$ | $P_P, \text{кВт}$ | $Q_P, \text{квар}$ | $F_{Ц}, \text{м}^2$ | $P_{уд}, \text{кВт/м}^2$ | $K_{СО}$ | $\cos\varphi_0$ | $\text{tg}\varphi_0$ | $P_{РО}, \text{кВт}$ | $Q_{РО}, \text{квар}$ | $P_P+P_{РО}, \text{кВт}$ | $Q_P+Q_{РО}, \text{квар}$ | $S, \text{кВА}$ |
|--|-----------------------|------|--------------------------|----------|---------------|--------------------|-------------------|--------------------|----------|-------------------|--------------------|---------------------|--------------------------|----------|-----------------|----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------|
| 1  | 2                     | 3    | 4                        | 5        | 6             | 7                  | 8                 | 9                  | 10       | 11                | 12                 | 13                  | 14                       | 15       | 16              | 17                   | 18                   | 19                    | 20                       | 21                        | 22              |
| Нагрузка 0,4 кВ                                | –                     | –    | –                        | –        | –             | –                  | –                 | –                  | –        | –                 | –                  | –                   | –                        | –        | –               | –                    | –                    | –                     | –                        | –                         | –               |
| Цех технической подготовки производства (ЦТПП) | –                     | 80   | 4000                     | 0,7<br>2 | 0,75          | 0,88               | 2880              | 2540               | 0,80     | 2304              | 2032               | 14400               | 0,020                    | 0,95     | 0,3             | 0,85                 | 245                  | 73                    | 2549                     | 2105                      | 3306            |
| Картоно–делательная машина (КДМ)               | –                     | 50   | 5000                     | 0,6<br>0 | 0,70          | 1,02               | 3000              | 3061               | 0,80     | 2400              | 2448               | 25792               | 0,015                    | 0,95     | 0,3             | 0,80                 | 310                  | 93                    | 2710                     | 2541                      | 3715            |
| Отделение роспуска картонной фабрики (РПО КДМ) | –                     | 125  | 7500                     | 0,6<br>0 | 0,52          | 1,64               | 4500              | 7392               | 0,80     | 3600              | 5913               | 18576               | 0,020                    | 0,95     | 0,3             | 0,90                 | 334                  | 100                   | 3934                     | 6014                      | 7186            |
| Фабрика гофротары (ФГТ)                        | –                     | 83   | 6600                     | 0,5<br>5 | 0,70          | 1,02               | 3630              | 3703               | 0,77     | 2795              | 2852               | 24768               | 0,020                    | 0,95     | 0,3             | 0,90                 | 446                  | 134                   | 3241                     | 2985                      | 4406            |
| Склад готовой продукции                        | –                     | 30   | 150                      | 0,3<br>0 | 0,65          | 1,17               | 45                | 53                 | 1,00     | 45                | 53                 | 19200               | 0,015                    | 0,95     | 0,3             | 0,60                 | 173                  | 52                    | 218                      | 104                       | 242             |
| Ремонтно–механический цех                      | –                     | 85   | 1786                     | 0,3<br>2 | 0,72          | 0,97               | 579               | 564                | 0,70     | 406               | 395                | 5820                | 0,015                    | 0,95     | 0,3             | 0,90                 | 79                   | 26                    | 484                      | 421                       | 641             |
| Отделение роспуска бумажной фабрики (РПО БФ)   | –                     | 65   | 1495                     | 0,7<br>5 | 0,70          | 1,02               | 1121              | 1144               | 0,80     | 897               | 915                | 11664               | 0,020                    | 0,95     | 0,3             | 0,90                 | 210                  | 63                    | 1107                     | 978                       | 1477            |
| Бумажная фабрика                               | –                     | 90   | 6400                     | 0,5<br>0 | 0,70          | 1,02               | 3200              | 3265               | 0,75     | 2400              | 2448               | 9792                | 0,015                    | 0,95     | 0,3             | 0,80                 | 118                  | 35                    | 2518                     | 2484                      | 3536            |
| Котельная                                      | –                     | 50   | 500                      | 0,6      | 0,70          | 1,02               | 300               | 306                | 0,85     | 255               | 260                | 7776                | 0,015                    | 0,95     | 0,3             | 0,90                 | 105                  | 31                    | 360                      | 292                       | 463             |

Продолжение таблицы 3

| 1  | 2    | 3   | 4     | 5        | 6    | 7         | 8     | 9     | 10   | 11    | 12    | 13     | 14    | 15   | 16  | 17   | 18   | 19  | 20    | 21    | 22    |
|--|------|-----|-------|----------|------|-----------|-------|-------|------|-------|-------|--------|-------|------|-----|------|------|-----|-------|-------|-------|
| Заводоуправление                                 | –    | 18  | 250   | 0,4<br>5 | 0,70 | 1,02      | 113   | 115   | 0,85 | 96    | 98    | 7200   | 0,020 | 0,95 | 0,3 | 0,80 | 115  | 35  | 211   | 132   | 249   |
| Освещение территории                             | –    | –   | –     | –        | –    | –         | –     | –     | –    | –     | –     | 254410 | 0,001 | 0,95 | 0,3 | 1,00 | 254  | 76  | 254   | 76    | 266   |
| Итого по нагрузке 0,4 кВ                         | –    | 512 | 33681 | 0,5<br>8 | 0,66 | 1,14      | 19368 | 22142 | 0,79 | 15198 | 17492 | –      | –     | –    | –   | –    | 2388 | 719 | 17586 | 18132 | 25259 |
| Нагрузка 10 кВ                                   | –    | –   | –     | –        | –    | –         | –     | –     | –    | –     | –     | –      | –     | –    | –   | –    | –    | –   | –     | –     | –     |
| 2 Картоно–делательная машина (КДМ).              | –    | –   | –     | –        | –    | –         | –     | –     | –    | –     | –     | –      | –     | –    | –   | –    | –    | –   | –     | –     | –     |
| Печь РКЗ   | 2500 | 2   | 5000  | 0,7<br>5 | 0,90 | 0,48      | 3750  | 1816  | 1,00 | 3750  | 1816  | –      | –     | –    | –   | –    | –    | –   | 3750  | 1816  | –     |
| Синхронные двигатели                             | 800  | 5   | 4000  | 0,7<br>0 | 0,85 | –<br>0,62 | 2800  | –1735 | 1,00 | 2800  | –1735 | –      | –     | –    | –   | –    | –    | –   | 2800  | –1735 | –     |
| 3 Отделение роспуска картонной фабрики (РПО КДМ) | –    | –   | –     | –        | –    | –         | –     | –     | –    | –     | –     | –      | –     | –    | –   | –    | –    | –   | –     | –     | –     |
| Электropечи ЭПТМ                                 | 1250 | 4   | 5000  | 0,5<br>5 | 0,65 | 1,17      | 2750  | 3215  | 1,00 | 2750  | 3215  | –      | –     | –    | –   | –    | –    | –   | 2750  | 3215  | –     |
| 9 Котельная. Асинхронные двигатели               | 250  | 5   | 1250  | 0,8<br>0 | 0,85 | 0,62      | 1000  | 620   | 1,00 | 1000  | 620   | –      | –     | –    | –   | –    | –    | –   | 1000  | 620   | –     |
| Итого по нагрузке 10 кВ                          | –    | 16  | 15250 | 0,6<br>8 | 0,93 | 0,38      | 10300 | 3916  | –    | 10300 | 3916  | –      | –     | –    | –   | –    | –    | –   | 10300 | 3916  | –     |
| Итого по предприятию                             | –    | –   | 48931 | 0,6<br>1 | 0,75 | 0,88      | 29668 | 26058 | –    | 25498 | 21330 | –      | –     | –    | –   | –    | 2388 | 719 | 27886 | 22048 | 35549 |

Выводы по разделу.

Во втором разделе ВКР рассчитаны электрические нагрузки ремонтно–механического цеха и всего предприятия ЗАО «Народное предприятие Набережно–Челнинский картонно–бумажный комбинат им. С.П. Титова» в целом. В результате проведенного расчета электрических нагрузок группы цехов промышленного предприятия ЗАО «Народное предприятие Набережно–Челнинский картонно–бумажный комбинат им. С.П. Титова» определены суммарные активные и реактивные мощности, а также пиковые и среднесуточные значения тока на основных потребителях. Были выявлены цехи, потребляющие наибольшее количество электроэнергии, что позволит оптимизировать распределение нагрузок и повысить эффективность использования электрооборудования предприятия. Расчет электрических нагрузок является важным этапом планирования и оптимизации электроснабжения промышленного предприятия и способствует повышению энергоэффективности его работы.

### 3 Выбор числа и мощности трансформаторов ГПП

Выбор трансформаторов для ГПП является одним из важных этапов проектирования электроснабжения предприятия, так как от правильного выбора зависит надежность и эффективность работы электросистемы предприятия.

Трансформаторы используются для изменения напряжения электроэнергии с целью передачи и распределения ее по потребителям. При выборе трансформаторов необходимо учитывать требуемую мощность, номинальное напряжение, класс точности и другие параметры.

Основным параметром при выборе трансформатора является его мощность. Мощность трансформатора должна быть достаточной для обеспечения нормальной работы электрооборудования на предприятии при максимальной нагрузке. При этом необходимо учитывать возможность роста потребления электроэнергии в будущем.

«Номинальная мощность силовых трансформаторов ГПП определяется из условия» [16]:

$$S_{р.п} = \sqrt{P_{р.п.}^2 + (Q_{эс} - \Delta Q_{т.ГПП})^2}, \quad (18)$$

где  $Q_{эс}$  – «экономически целесообразная реактивная мощность на стороне ВН ГПП, квар» [16];

$\Delta Q_{т.ГПП}$  – «потери реактивной мощности в трансформаторах ГПП, квар» [16].

«Экономически целесообразная реактивная мощность на стороне высшего напряжения ГПП равна» [16]:

$$Q_{эс} = P_{р.п.} \cdot \operatorname{tg}\varphi_{\text{норм}}, \quad (19)$$

где  $\operatorname{tg}\varphi_{\text{норм}}$  – нормируемый  $\operatorname{tg}\varphi$ ;

$$Q_{\text{эс.110}} = 24364 \cdot 0,5 = 12182 \text{ квар.}$$

«Коэффициент реактивной мощности, задаваемый предприятию энергосистемой» [16]:

$$\text{tg}\varphi_3 = \frac{Q_{\text{эс}}}{P_{\text{р.п}}}, \quad (20)$$

$$\text{tg}\varphi_{3.110} = \frac{12182}{24364} = 0,50.$$

«Потери реактивной мощности в трансформаторах ГПП» [16]:

$$\Delta Q_{\text{т.ГПП}} \approx 0,07 \sqrt{P_{\text{р.п.}}^2 + Q_{\text{эс}}^2}, \quad (21)$$

$$\Delta Q_{\text{т.ГПП.110}} = 0,07 \cdot \sqrt{24364^2 + 12182^2} = 1907 \text{ квар.}$$

«Полная расчетная нагрузка предприятия, необходимая для выбора трансформаторов на ГПП» [16]:

$$S_{\text{р.п.110}} = \sqrt{24364^2 + (12182 - 1907)^2} = 26443 \text{ квар.}$$

«На ГПП устанавливается два силовых трансформатора. В этом случае при правильном выборе мощности трансформаторов обеспечивается надёжное электроснабжение потребителей даже при аварийном отключении одного из них» [16].

«Номинальная мощность каждого трансформатора определяется из соотношений» [16]:



$$S_{\text{т.ном}} \geq \frac{S_{\text{р.п.}}}{n \cdot k_{\text{з.н.}}}, \quad (22)$$

где  $n = 2$  – «число трансформаторов ГПП» [16];

$k_{\text{з.н.}} = 0,7$  – «коэффициент загрузки трансформаторов в нормальном режиме» [16].

$$S_{\text{т.ном.110}} \geq \frac{26443}{2 \cdot 0,7} = 18888 \text{ кВА.}$$

Так как есть возможность подключить ГПП предприятия по ВЛ 110 кВ, то «выбираются трансформаторы типа ТРДН–25000/110/10/10, технические характеристики которых представлены в таблице 4» [9].

Таблица 4– Технические характеристики трансформаторов

| $S_{\text{тр}}$ , кВА | $U_{\text{вн}}$ , кВ | $U_{\text{нн}}$ , кВ | $\Delta P_{\text{кз}}$ , кВт | $\Delta P_{\text{хх}}$ , кВт | $U_{\text{кз}}$ , % | $I_{\text{хх}}$ , % |
|-----------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|---------------------|
| 25000                 | 110                  | 10/10                | 120                          | 22,0                         | 10,5                | 0,3                 |

«Коэффициент загрузки выбранных трансформаторов» [16]:

$$k_{\text{з.н.}} = \frac{S_{\text{р.п.}}}{n \cdot S_{\text{н.т.}}}, \quad (23)$$

$$k_{\text{з.н.110}} = \frac{26443}{2 \cdot 25000} = 0,53.$$

Выводы по разделу.

В третьем разделе ВКР выбраны силовые трансформаторы ГПП группы цехов промышленного предприятия ЗАО «Народное предприятие Набережно–Челнинский картонно–бумажный комбинат им. С.П. Титова» выбираются трансформаторы типа ТРДН–25000/110/10/10.

#### 4 Картограмма нагрузок и определение центра электрических нагрузок

Картограмма электрических нагрузок представляет собой графическое изображение электрических нагрузок на объекте или системе электроснабжения. Она составляется на основе расчета электрических нагрузок и отображает распределение нагрузок по времени и по местам установки потребителей. Картограмма электрических нагрузок является важным инструментом для планирования и оптимизации работы системы электроснабжения. Она позволяет выявить потребители, вносящие наибольший вклад в общую нагрузку.

«Радиусы окружностей и углы секторов» [17] можно определить по выражениям:

$$R_i = \sqrt{\frac{P_{Pi}}{\pi \cdot m}}, \quad (24)$$

$$\alpha_{н/вi} = 360 \cdot \frac{P_{P.н/вi}}{P_{Pi}}, \quad (25)$$

$$\alpha_{в/вi} = 360 \cdot \frac{P_{P.в/вi}}{P_{Pi}}, \quad (26)$$

$$\alpha_{освi} = 360 \cdot \frac{P_{P.освi}}{P_{Pi}}, \quad (27)$$

где  $P_{pi}$ ,  $P_{р.н/вi}$ ,  $P_{р.в/вi}$ ,  $P_{р.освi}$  – «расчетные активные нагрузки соответственно всего цеха, потребителей электроэнергии напряжением до 1000 В, потребителей электроэнергии напряжением выше 1000 В и электроосвещения, кВт» [17];

$m$  – «масштаб площади картограмм электрических нагрузок, кВт/мм<sup>2</sup>» [17].

«Масштаб определяется из условия, что радиус окружности, соответствующий минимальной расчетной нагрузке» [17], составляет 10 мм:

$$m = \frac{P_{p/min}}{\pi \cdot R_{min}^2}, \quad (28)$$

$$m = \frac{105}{3,14 \cdot 10^2} = 0,67 \text{ кВт/мм}^2.$$

«В качестве примера приведем расчеты радиуса окружности и углы секторов для картоно-делательной машины (КДМ)» [17]:

$$R_i = \sqrt{\frac{9260}{3,14 \cdot 0,67}} = 66 \text{ мм};$$

$$\alpha_{н/вi} = 360 \cdot \frac{2400}{9260} = 93;$$

$$\alpha_{в/вi} = 360 \cdot \frac{6550}{9260} = 255;$$

$$\alpha_{освi} = 360 \cdot \frac{398}{9260} = 12.$$

ЦЭН комбината — это абстрактное понятие, обозначающее точку, в которой складывается электроэнергия, потребляемая всеми производственными и не производственными потребителями комбината. ЦЭН является основным узлом энергетической системы комбината и обычно располагается на месте, где сходятся линии электропередачи, подающие электроэнергию на комбинат. Координаты ЦЭН определяются по формуле:

$$X_{ц} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{pi} \cdot X_i}{\sum_{i=1}^n P_{pi}}, \quad (29)$$

$$y_{ц} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{pi} \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n P_{pi}}, \quad (30)$$

где  $x_i, y_i$ —«координаты центра электрической нагрузки  $i$ -го цеха на»  
[17] генплане комбината, м.

$$x_{ц} = \frac{2549 \cdot 565 + 9260 \cdot 398 + \dots + 1360 \cdot 535 + 211 \cdot 49}{27631} = 424 \text{ мм};$$

$$y_{ц} = \frac{2549 \cdot 343 + 9260 \cdot 335 + \dots + 1360 \cdot 84 + 211 \cdot 315}{27631} = 243 \text{ мм}.$$

Результаты расчета сведены в таблицу 5. Картограмма электрических нагрузок группы цехов промышленного предприятия ЗАО «Народное предприятие Набережно–Челнинский картонно–бумажный комбинат им. С.П. Титова» представлена в графической части.

Таблица 5–Картограмма электрических нагрузок группы цехов промышленного предприятия ЗАО «Народное предприятие Набережно–Челнинский картонно–бумажный комбинат им. С.П. Титова»

| Наименование цеха                              | $P_{pi}$ ,<br>кВт | $P_{р.н/вi}$ ,<br>кВт | $P_{р.освi}$ ,<br>кВт | $P_{р.в/вi}$ ,<br>кВт | $X_i$ ,<br>м | $Y_i$ ,<br>м | $R_i$ ,<br>мм | $\alpha_{н/вi}$ ,<br>град | $\alpha_{освi}$ ,<br>град | $\alpha_{в/вi}$ ,<br>град |
|--|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|--------------|---------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1  | 2                 | 3                     | 4                     | 5                     | 6            | 7            | 8             | 9                         | 10                        | 11                        |
| Цех технической подготовки производства (ЦТПП) | 2549              | 2304                  | 245                   | –                     | 565          | 343          | 35            | 325                       | 35                        | 0                         |
| Картонно–делательная машина (КДМ)              | 9260              | 2400                  | 310                   | 6550                  | 398          | 335          | 66            | 93                        | 12                        | 255                       |
| Отделение роспуска картонной фабрики (РПО КДМ) | 6684              | 3600                  | 334                   | 2750                  | 567          | 166          | 56            | 194                       | 18                        | 148                       |
| Фабрика гофротары (ФГТ)                        | 3241              | 2795                  | 446                   | –                     | 229          | 323          | 39            | 310                       | 50                        | 0                         |
| Склад готовой продукции                        | 218               | 45                    | 173                   | –                     | 205          | 199          | 10            | 74                        | 286                       | 0                         |
| Ремонтно–механический цех                      | 484               | 406                   | 79                    | –                     | 60           | 199          | 15            | 302                       | 58                        | 0                         |
| Отделение роспуска бумажной фабрики            | 1107              | 897                   | 210                   | –                     | 64           | 92           | 23            | 292                       | 68                        | 0                         |

Продолжение таблицы 5

| 1                | 2     | 3     | 4    | 5     | 6   | 7   | 8  | 9   | 10  | 11  |
|------------------|-------|-------|------|-------|-----|-----|----|-----|-----|-----|
| (РПО БФ)         | –     | –     | –    | –     | –   | –   | –  | –   | –   | –   |
| Бумажная фабрика | 2518  | 2400  | 118  | –     | 469 | 63  | 35 | 343 | 17  | 0   |
| Котельная        | 1360  | 255   | 105  | 1000  | 535 | 84  | 25 | 68  | 28  | 265 |
| Заводоуправление | 211   | 96    | 115  | –     | 49  | 315 | 10 | 163 | 197 | 0   |
| Итого            | 27632 | 15198 | 2134 | 10300 | 424 | 243 | –  | –   | –   | –   |

При определении месторасположения ГПП группы цехов промышленного предприятия ЗАО «Народное предприятие Набережно–Челнинский картонно–бумажный комбинат им. С.П. Титова», кроме расположения ЦЭН учитывается расположение основных потребителей электроэнергии, а также расстояние между ними и источниками электроэнергии. Кроме того, учитываются требования к качеству электроснабжения и надежности работы электрооборудования, возможности подключения дополнительных потребителей, условия эксплуатации трансформаторов и других элементов электроснабжения, а также экономические и экологические факторы. Все эти факторы необходимо учитывать при проектировании и выборе места установки ГПП, чтобы обеспечить эффективную и надежную работу электроснабжения предприятия. «С учетом данных факторов, координаты размещения ГПП предприятия» [17]:  $x_{ГПП} = 355$  м;  $y_{ГПП} = 212$  м.

Выводы по разделу.

В четвертом разделе ВКР построена картограмма нагрузок и определен ЦЭН. Также определено место размещения ГПП предприятия.

## 5 Определение типа, количество и мощности КТП с учетом компенсирующих устройств

Выбор типов трансформаторов производится в зависимости от условий окружающей среды. Для установки снаружи цехов используют масляные трансформаторы. Для установки внутри цехов тоже в большинстве случаев рекомендуется использование масляных трансформаторов, кроме производственных помещений, где по каким-либо причинам нельзя использовать масляные трансформаторы. Для электроснабжения группы цехов промышленного предприятия ЗАО «Народное предприятие Набережно-Челнинский картонно-бумажный комбинат им. С.П. Титова» применяются трансформаторы типа ТМГ [3].

Количество и мощность силовых трансформаторов определяются исходя из распределения нагрузок по цеху, наличия места для размещения ЦТП, характера и режима работы потребителей электроэнергии.

Число трансформаторов, устанавливаемых на всех подстанциях цеха можно определить по выражению

$$N_0 = \frac{P_{р.ц}}{k_{з.доп} \cdot S_{т.н}}, \quad (31)$$

где  $P_{р.ц}$  – расчетная активная мощность цеха, Вт;

$S_{т.н.}$  – «номинальная мощность трансформаторов ЦТП, кВА» [2];

$k_{з.доп}$  – «допустимый коэффициент загрузки» [2].

При установке двухтрансформаторной подстанции в цехе, определение номинальной мощности силового трансформатора происходит на основании следующего условия:

$$S_{т.н} \geq \frac{P_{р.ц}}{N_t \cdot k_{з.доп}}, \quad (32)$$

где  $N_T = 2$  – «число трансформаторов в цехе» [2].

«Величина наибольшей реактивной мощности, которую силовой трансформатор может передать в сеть низшего напряжения из условия допустимой загрузки» [13]:

$$Q_{1p} = \sqrt{(N_T \cdot K_{з.доп} \cdot S_{Т.Н})^2 - P_{р.ц}^2} \quad (33)$$

«В общем случае мощности  $Q_{1p}$  и  $Q_{р.ц}$  не равны. Поэтому реальная величина реактивной мощности  $Q_1$ , проходящей через трансформатор определяется из соотношений» [13]:

$$Q_1 = \begin{cases} Q_{р.ц}, & \text{если } Q_{1p} \geq Q_{р.ц} \\ Q_{1p}, & \text{если } Q_{1p} < Q_{р.ц} \end{cases} \quad (34)$$

«Из анализа выражения (34) следует: если наибольшая реактивная мощность  $Q_{1p}$  оказывается больше или равной расчётной реактивной нагрузке цеха  $Q_{р.ц}$ , то это означает, что через трансформатор из сети напряжением 10 кВ в сеть НН будет передаваться мощность  $Q_1$ , равная расчётной реактивной нагрузке цеха  $Q_{р.ц}$ » [13].

«Если оказывается, что мощность  $Q_{1p}$  меньше нагрузки  $Q_{р.ц}$ , то есть трансформаторы ТП не могут пропустить всю расчётную реактивную нагрузку  $Q_{р.ц}$ , то для устранения дефицита реактивной мощности на стороне низшего напряжения ТП необходимо установить низковольтную конденсаторную батарею, мощность которой определяется по формуле» [13]:

$$Q_{к.н} = Q_{р.ц} - Q_1 \quad (35)$$

«Для трансформаторов выбранной мощностью определяются фактические коэффициенты загрузки в нормальном и послеаварийном режимах работы ТП» [2]:

$$K_{з.н} = \frac{\sqrt{P_{р.ц}^2 + Q_1^2}}{N_T \cdot S_{т.н}}, \quad (36)$$

$$K_{з.п} = \frac{\sqrt{P_{р.ц}^2 + Q_1^2}}{(N_T - 1) \cdot S_{н.т.i}}. \quad (37)$$

В качестве примера рассчитывается ТП для отделения роспуска бумажной фабрики.

«Категория по надёжности электроснабжения вторая, значит, в данном цехе необходимо предусмотреть установку двухтрансформаторной ТП» [2].

«При установке в цехе двухтрансформаторной ТП номинальная мощность трансформатора определяется из условия» [2]:

$$S_{т.н} \geq \frac{1107}{2 \cdot 0,7} = 791 \text{ кВА}.$$

Поэтому принимаются силовые трансформаторы мощностью 1000 кВА.

«Величина наибольшей реактивной мощности, которую силовой трансформатор может передать в сеть низшего напряжения из условия допустимой загрузки» [2]:

$$Q_{1р} = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 1000)^2 - 1107^2} = 857 \text{ кВА}.$$

Расчет для остальных КТП представлен в таблице 6.



Таблица 6– Выбор числа и мощности трансформаторных подстанций

| Наименование цехов и узлов СЭС                   | К.Н. | P <sub>P</sub> , кВт | Q <sub>P</sub> , квар | S <sub>P</sub> , кВА | Номер ТП | Тип тр–ра | S <sub>НОМТР</sub> , кВА | n <sub>Т</sub> | Кол–во ТП | Кзтдоп | Q <sub>ПР</sub> , квар | Q <sub>Л</sub> , квар | Q <sub>КУ</sub> , квар | Кзтнорм | Кзтп/ав | ΔP <sub>XX</sub> , кВт | ΔP <sub>КЗ</sub> , кВт | I <sub>XX</sub> , % | U <sub>КЗ</sub> , % | ΔP <sub>Т</sub> , кВт | ΔQ <sub>Т</sub> , квар | P <sub>P</sub> +ΔP <sub>Т</sub> , кВт | Q <sub>Т</sub> +ΔQ <sub>Т</sub> , квар | S <sub>P</sub> , кВА |
|--|------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------|-----------|--------------------------|----------------|-----------|--------|------------------------|-----------------------|------------------------|---------|---------|------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------------------|--|----------------------|
| 1  | 2    | 3                    | 4                     | 5                    | 6        | 7         | 8                        | 9              | 10        | 11     | 12                     | 13                    | 14                     | 15      | 16      | 17                     | 18                     | 19                  | 20                  | 21                    | 22                     | 23                                    | 24                                     | 25                   |
| 1 Цех технической подготовки производства (ЦТПП) | 2    | 2549                 | 2105                  | 3306                 | -        | -         | -                        | -              | -         | -      | -                      | -                     | -                      | -       | -       | -                      | -                      | -                   | -                   | -                     | -                      | -                                     | -                                      | -                    |
| Итого по ТП1–ТП2:                                |      | 2549                 | 2105                  | 3306                 | 1–2      | ТМГ       | 1000                     | 2              | 2         | 0,7    | 1159                   | 1159                  | 946                    | 0,70    | 1,40    | 2,45                   | 11,0                   | 1,4                 | 5,5                 | 31                    | 164                    | 2580                                  | 1323                                   | 2900                 |
| 2 Картоно–делательная машина (КДМ)               | 2    | 2710                 | 2541                  | 3715                 | -        | -         | -                        | -              | -         | -      | -                      | -                     | -                      | -       | -       | -                      | -                      | -                   | -                   | -                     | -                      | -                                     | -                                      | -                    |
| Итого по ТП3–ТП4:                                |      | 2710                 | 2541                  | 3715                 | 3–4      | ТМГ       | 1000                     | 2              | 2         | 0,7    | 706                    | 706                   | 1835                   | 0,70    | 1,40    | 2,45                   | 11,0                   | 1,4                 | 5,5                 | 31                    | 164                    | 2741                                  | 870                                    | 2876                 |
| 3 Отделение роспуска картонной фабрики (РПО КДМ) | 2    | 3934                 | 6014                  | 7186                 | -        | -         | -                        | -              | -         | -      | -                      | -                     | -                      | -       | -       | -                      | -                      | -                   | -                   | -                     | -                      | -                                     | -                                      | -                    |
| Итого по ТП5–ТП6:                                |      | 3934                 | 6014                  | 7186                 | 5–6      | ТМГ       | 2500                     | 2              | 2         | 0,7    | 5790                   | 5790                  | 224                    | 0,70    | 1,40    | 3,85                   | 23,5                   | 1,0                 | 6,5                 | 61                    | 419                    | 3996                                  | 6208                                   | 7383                 |
| 4 Фабрика гофротары (ФГТ)                        | 2    | 3241                 | 2985                  | 4406                 | -        | -         | -                        | -              | -         | -      | -                      | -                     | -                      | -       | -       | -                      | -                      | -                   | -                   | -                     | -                      | -                                     | -                                      | -                    |
| Итого по ТП7–ТП9:                                |      | 3241                 | 2985                  | 4406                 | 7–9      | ТМГ       | 1000                     | 2              | 3         | 0,7    | 2671                   | 2671                  | 314                    | 0,70    | 1,40    | 2,45                   | 11,0                   | 1,4                 | 5,5                 | 47                    | 246                    | 3288                                  | 2917                                   | 4395                 |
| 5 Склад готовой продукции                        | 3    | 218                  | 104                   | 242                  | РПН 1    | -         | -                        | -              | -         | -      | -                      | -                     | -                      | -       | -       | -                      | -                      | -                   | -                   | -                     | -                      | -                                     | -                                      | -                    |
| 6 Ремонтно–механический цех                      | 2    | 484                  | 421                   | 641                  | -        | -         | -                        | -              | -         | -      | -                      | -                     | -                      | -       | -       | -                      | -                      | -                   | -                   | -                     | -                      | -                                     | -                                      | -                    |
| 10 Заводуправление                               | 2    | 211                  | 132                   | 249                  | РПН 2    | -         | -                        | -              | -         | -      | -                      | -                     | -                      | -       | -       | -                      | -                      | -                   | -                   | -                     | -                      | -                                     | -                                      | -                    |

Продолжение таблицы 6

| 1   | 2 | 3    | 4    | 5    | 6        | 7   | 8    | 9 | 10 | 11  | 12   | 13   | 14  | 15   | 16   | 17   | 18   | 19  | 20  | 21  | 22   | 23   | 24   | 25   |
|---|---|------|------|------|----------|-----|------|---|----|-----|------|------|-----|------|------|------|------|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| Итого по ТП10:                                      |   | 913  | 657  | 1125 | 10       | ТМГ | 1000 | 2 | 1  | 0,7 | 1062 | 657  | 0   | 0,66 | 1,32 | 2,45 | 11,0 | 1,4 | 5,5 | 15  | 76   | 927  | 734  | 1182 |
| 7 Отделение<br>ропуска бумажной<br>фабрики (РПО БФ) | 2 | 1107 | 978  | 1477 | –        | –   | –    | – | –  | –   | –    | –    | –   | –    | –    | –    | –    | –   | –   | –   | –    | –    | –    | –    |
| Итого по ТП11:                                      | – | 1107 | 978  | 1477 | 11       | ТМГ | 1000 | 2 | 1  | 0,7 | 857  | 857  | 121 | 0,70 | 1,40 | 2,45 | 11,0 | 1,4 | 5,5 | 16  | 82   | 1123 | 939  | 1464 |
| 8 Бумажная фабрика                                  | 2 | 2518 | 2484 | 3536 | –        | –   | –    | – | –  | –   | –    | –    | –   | –    | –    | –    | –    | –   | –   | –   | –    | –    | –    | –    |
| 9 Котельная   | 2 | 360  | 292  | 463  | РПН<br>3 | –   | –    | – | –  | –   | –    | –    | –   | –    | –    | –    | –    | –   | –   | –   | –    | –    | –    | –    |
| Итого по ТП12:                                      | – | 2877 | 2775 | 3998 | 12       | ТМГ | 2500 | 2 | 1  | 0,7 | 1993 | 1993 | 783 | 0,70 | 1,40 | 3,85 | 23,5 | 1,0 | 6,5 | 31  | 209  | 2908 | 2202 | 3648 |
| Итого по<br>предприятию:                            | – | –    | –    | –    | –        | –   | –    | – | –  | –   | –    | –    | –   | –    | –    | –    | –    | –   | –   | 254 | 1479 | –    | –    | –    |

Так как

$$Q_{ip} < Q_{p.ц},$$
$$857 < 978 \text{ квар},$$

«то для устранения дефицита реактивной мощности на стороне низшего напряжения ТП необходимо установить низковольтную конденсаторную батарею, мощность которой равна» [2]:

$$Q_{к.н} = 978 - 857 = 121 \text{ квар}.$$

«Фактические коэффициенты загрузки в нормальном и послеаварийном режимах работы ТП» [2]:

$$K_{з.н} = \frac{\sqrt{1107^2 + 857^2}}{2 \cdot 1000} = 0,70,$$
$$K_{з.п} = \frac{\sqrt{1107^2 + 857^2}}{(2-1) \cdot 1000} = 1,40.$$

«Выбор остальных цеховых трансформаторных подстанций представлены в таблице 6» [2].

Выводы по разделу.

В пятом разделе ВКР выбраны силовые трансформаторы КТП предприятия.

## 6 Выбор сечения питающей линии и распределительных сетей

«Сечение высоковольтных кабелей необходимо определять по экономической плотности тока и проверять по длительному допустимому току кабелей в нормальном режиме работы, учитывая условия его прокладки, по току в послеаварийном режиме, по потере напряжения в послеаварийном режиме и термической стойкости к ТКЗ» [11].

«Расчетный ток, протекающий по КЛ в нормальном режиме» [11]:

$$I_{p.k} = \frac{S_{p.k}}{\sqrt{3} \cdot U_H} \quad (38)$$
$$I_{p.k.1} = \frac{1450}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 84 \text{ А.}$$

«Сечение кабелей первоначально вычисляется по экономической плотности тока по выражению» [11]:

$$F_3 = \frac{I_{p.k.}}{j_3}, \quad (39)$$

где  $j_3$  – «экономическая плотность тока, зависит от типа кабеля и времени использования максимума нагрузки, А/мм<sup>2</sup>» [14].

«Для кабелей с алюминиевыми жилами и изоляцией из сшитого полиэтилена, с учетом того, что число часов использования максимума нагрузки  $T_m = 4355$  ч/год» [11] «экономическая плотность тока равна  $j_3=1,7$  А/мм<sup>2</sup>» [14], тогда сечение КЛ

$$F_{31} = \frac{84}{1,7} = 51 \text{ мм}^2.$$

«По результатам расчетов следует выбрать кабель, который имеет ближайшее меньшее стандартное сечение по отношению к  $F_э$ , поэтому принимается кабель типа АПвПу–10 (3х50) с параметрами: длительно–допустимый ток  $I_{доп} = 135$  А, удельные сопротивления:  $r_0 = 0,77$  Ом/км,  $x_0 = 0,13$  Ом/км» [11].

«Фактический допустимый ток кабеля с учетом условий его прокладки равен» [11]:

$$I_{доп.ф} = K_n \cdot K_t \cdot I_{доп} > \frac{I_{р.к}}{n_k}; \quad (40)$$

где  $K_n$  – «поправочный коэффициент на число параллельно прокладываемых кабелей» [14];

$K_t$  – «поправочный коэффициент на температуру среды, в которой прокладывается кабель» [14];

$n_k$  – «число запараллеленных кабелей в КЛ» [14].

$$I_{доп.ф.1} = 0,85 \cdot 1,01 \cdot 135 = 116 > \frac{84}{1} = 84 \text{ А.}$$

Условие выполняется.

Послеаварийный режим КЛ (кабельной линии) - это режим работы электрической сети, который происходит после возникновения аварийных ситуаций. В этом режиме проводятся мероприятия по восстановлению работоспособности системы, проверяется и устраняется повреждение оборудования, а также осуществляется организация временного режима работы системы до полного восстановления обычного режима работы. Для обеспечения безопасности работников и электросетей в переходный период послеаварийный режим может быть ограничен по мощности и допустимым режимам работы.

$$I_{ав} = 2 \cdot I_{р.к} \quad (41)$$

$$I_{ав1} = 2 \cdot 84 = 168 \text{ А.}$$

«Допустимая перегрузка кабеля в послеаварийном режиме» [11]±:

$$I'_{ав} = K_{ав} \cdot I_{доп.ф}, \quad (42)$$

где  $K_{ав}$  – «коэффициент перегрузки, определяется в зависимости от коэффициента предварительной нагрузки  $K_3$ » [11];

$$K_3 = \frac{I_{р.к.}}{I'_{доп}}, \quad (43)$$

$$K_3 = \frac{84}{116} = 0,72,$$

$$I'_{ав} = 1,25 \cdot 116 = 145 \text{ А.}$$

«Проверка по току перегрузки» [11] осуществляется по формуле:

$$I'_{ав} \geq \frac{I_{ав}}{n_k}, \quad (44)$$

$$145 \text{ А} < 168 \text{ А.}$$

«Значит, выбранный кабель не проходит проверку по току перегрузки, поэтому принимается решение увеличить сечение кабеля до АПвПу–10 (3х70) с параметрами:  $I_{доп}=165 \text{ А}$ ,  $r_0=0,55 \text{ Ом/км}$ ,  $x_0=0,12 \text{ Ом/км}$ » [11].

Тогда

Таблица 7–Расчет кабельных линий

| Конечные<br>пункты КЛ | P <sub>p</sub> , кВт | Q <sub>p</sub> , квар | S <sub>p</sub> , кВА | I <sub>рк</sub> , А | F <sub>э</sub> , мм <sup>2</sup> | F <sub>т.с.</sub> , мм <sup>2</sup> | F <sub>ст</sub> , мм <sup>2</sup> | Тип кабеля         | Способ<br>прокл. | Нагрузка, А  |             | I <sub>доп</sub> , А | К <sub>л</sub> | К <sub>т</sub> | Γ <sub>доп</sub> , А | К <sub>ав</sub> | Γ <sub>ав</sub> , А | L, км | r <sub>0</sub> , Ом/км | x <sub>0</sub> , Ом/км | ΔU, % |
|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|------------------|--------------|-------------|----------------------|----------------|----------------|----------------------|-----------------|---------------------|-------|------------------------|------------------------|-------|
|                       |                      |                       |                      |                     |                                  |                                     |                                   |                    |                  | норм<br>реж. | п/а<br>реж. |                      |                |                |                      |                 |                     |       |                        |                        |       |
| 1                     | 2                    | 3                     | 4                    | 5                   | 6                                | 7                                   | 8                                 | 9                  | 10               | 11           | 12          | 13                   | 14             | 15             | 16                   | 17              | 18                  | 19    | 20                     | 21                     | 22    |
| 10 кВ                 |                      |                       |                      |                     |                                  |                                     |                                   |                    |                  |              |             |                      |                |                |                      |                 |                     |       |                        |                        |       |
| ГПП – ТП–1            | 1290                 | 661                   | 1450                 | 84                  | 51                               | 120                                 | 120                               | 2×АПвПу–10 (3х120) | в траншее        | 84           | 168         | 220                  | 0,85           | 1,01           | 189                  | 1,25            | 236                 | 0,305 | 0,32                   | 0,11                   | 0,30  |
| ТП–1 – ТП–2           | 645                  | 331                   | 725                  | 40                  | 23                               | 120                                 | 120                               | 2×АПвПу–10 (3х120) | в траншее        | 40           | 80          | 220                  | 0,93           | 1,01           | 207                  | 1,25            | 258                 | 0,120 | 0,32                   | 0,11                   | 0,06  |
| ГПП – ТП–3            | 1290                 | 661                   | 1450                 | 80                  | 47                               | 120                                 | 120                               | 2×АПвПу–10 (3х120) | в траншее        | 80           | 160         | 220                  | 0,87           | 1,01           | 193                  | 1,25            | 242                 | 0,184 | 0,32                   | 0,11                   | 0,18  |
| ТП–3 – ТП–4           | 645                  | 331                   | 725                  | 40                  | 23                               | 120                                 | 120                               | 2×АПвПу–10 (3х120) | на лотках        | 40           | 80          | 200                  | 1,00           | 1,04           | 208                  | 1,25            | 260                 | 0,064 | 0,32                   | 0,11                   | 0,03  |
| ГПП – ТП–5            | 999                  | 1552                  | 1846                 | 101                 | 60                               | 120                                 | 120                               | 2×АПвПу–10 (3х120) | на лотках        | 101          | 203         | 200                  | 1,00           | 1,04           | 208                  | 1,25            | 260                 | 0,185 | 0,32                   | 0,11                   | 0,18  |
| ГПП – ТП–6            | 999                  | 1552                  | 1846                 | 101                 | 60                               | 120                                 | 120                               | 2×АПвПу–10 (3х120) | на лотках        | 101          | 203         | 200                  | 1,00           | 1,04           | 208                  | 1,25            | 260                 | 0,048 | 0,32                   | 0,11                   | 0,05  |
| ГПП – ТП–7            | 1644                 | 1459                  | 2198                 | 121                 | 71                               | 185                                 | 185                               | 2×АПвПу–10 (3х185) | на лотках        | 121          | 242         | 255                  | 0,87           | 1,01           | 224                  | 1,25            | 280                 | 0,325 | 0,16                   | 0,10                   | 0,27  |
| ТП–7 – ТП–8           | 1096                 | 972                   | 1465                 | 81                  | 47                               | 120                                 | 120                               | 2×АПвПу–10 (3х120) | в траншее        | 81           | 161         | 220                  | 0,93           | 1,01           | 207                  | 1,25            | 258                 | 0,074 | 0,32                   | 0,11                   | 0,07  |
| ТП–8 – ТП–9           | 548                  | 486                   | 733                  | 40                  | 24                               | 120                                 | 120                               | 2×АПвПу–10 (3х120) | в траншее        | 40           | 81          | 220                  | 0,93           | 1,01           | 207                  | 1,25            | 258                 | 0,056 | 0,32                   | 0,11                   | 0,03  |
| ГПП – ТП–10           | 464                  | 367                   | 591                  | 33                  | 19                               | 120                                 | 120                               | 2×АПвПу–10 (3х120) | в траншее        | 33           | 65          | 220                  | 0,87           | 1,01           | 193                  | 1,25            | 242                 | 0,314 | 0,32                   | 0,11                   | 0,12  |

Окончание таблицы 7

| 1           | 2    | 3    | 4    | 5   | 6  | 7       | 8   | 9                  | 10        | 11  | 12  | 13  | 14   | 15   | 16  | 17   | 18  | 19    | 20   | 21   | 22   |
|-------------|------|------|------|-----|----|---------|-----|--------------------|-----------|-----|-----|-----|------|------|-----|------|-----|-------|------|------|------|
| ГПП – ТП–11 | 561  | 470  | 732  | 40  | 24 | 12<br>0 | 120 | 2×АПвПу–10 (3х120) | в траншее | 40  | 80  | 220 | 0,93 | 1,01 | 207 | 1,25 | 258 | 0,046 | 0,32 | 0,11 | 0,02 |
| ГПП – ТП–12 | 1454 | 1101 | 1824 | 100 | 59 | 12<br>0 | 120 | 2×АПвПу–10 (3х120) | в траншее | 100 | 201 | 220 | 0,93 | 1,01 | 207 | 1,25 | 258 | 0,214 | 0,32 | 0,11 | 0,25 |
| ГПП – СД    | 800  | 496  | 941  | 52  | 30 | 70      | 70  | АПвПу–10 (3х70)    | в траншее | 52  | –   | 165 | 0,86 | 1,01 | 143 | –    | –   | 0,085 | 0,55 | 0,12 | 0,06 |
| ГПП – РКЗ   | 2500 | 1211 | 2778 | 153 | 90 | 15<br>0 | 150 | АПвПу–10 (3х150)   | на лотках | 153 | –   | 245 | 0,85 | 1,04 | 217 | –    | –   | 0,064 | 0,26 | 0,11 | 0,10 |
| ГПП – ЭПТМ  | 1250 | 1461 | 1923 | 106 | 62 | 15<br>0 | 150 | АПвПу–10 (3х150)   | в траншее | 106 | –   | 245 | 0,87 | 1,01 | 215 | –    | –   | 0,166 | 0,26 | 0,11 | 0,16 |
| ГПП – АД    | 250  | 155  | 294  | 16  | 10 | 70      | 70  | АПвПу–10 (3х70)    | в траншее | 16  | –   | 165 | 0,85 | 1,04 | 146 | –    | –   | 0,192 | 0,55 | 0,12 | 0,06 |
| 0,4 кВ      |      |      |      |     |    |         |     |                    |           |     |     |     |      |      |     |      |     |       |      |      |      |
| ТП–10–РПН1  | 218  | 104  | 242  | 349 | –  | –       | 95  | 2×ААПл–1 (4х95)    | в траншее | 174 | –   | 235 | 0,86 | 1,01 | 204 | –    | –   | 0,052 | 0,41 | 0,06 | 1,53 |
| ТП–10–РПН2  | 105  | 66   | 124  | 180 | –  | –       | 185 | 2×ААПл–1 (4х185)   | в траншее | 180 | 359 | 355 | 0,93 | 1,01 | 333 | 1,25 | 417 | 0,045 | 0,21 | 0,06 | 1,44 |
| ТП–12–РПН3  | 180  | 146  | 232  | 334 | –  | –       | 185 | 4×ААПл–1 (4х185)   | в траншее | 167 | 334 | 355 | 0,93 | 1,01 | 333 | 1,25 | 417 | 0,032 | 0,21 | 0,06 | 1,82 |



$$I_{\text{доп.ф.1}} = 0,85 \cdot 1,01 \cdot 165 = 142 > \frac{84}{1} = 84 \text{ А},$$

$$I'_{\text{ав}} = 1,25 \cdot 142 = 177 > 168 \text{ А}.$$

Условие выполнено.

Потери напряжения в КЛ являются неизбежной характеристикой передачи электроэнергии на расстоянии. Они происходят из-за электрического сопротивления проводов, которое приводит к падению напряжения на длине линии. Чем больше расстояние между источником и потребителем, тем больше потери напряжения:

$$\Delta U = \frac{P_p \cdot r_0 \cdot L + Q_1 \cdot x_0 \cdot L}{n_k \cdot U_n^2} \cdot 100\% \leq \Delta U_{\text{доп}} = 5\%, \quad (45)$$

где  $r_0$  и  $x_0$  – «удельные сопротивления кабеля, Ом/км» [11];

$L$  – длина КЛ, км.

$$\Delta U_1 = \frac{1290 \cdot 0,55 \cdot 0,305 + 661 \cdot 0,12 \cdot 0,305}{1 \cdot 10^5} \cdot 100\% = 0,48 < 5\% .$$

Что удовлетворяет требованиям ГОСТ 32144-2013 [3].

На этом предварительный расчет КЛ заканчивается. Рассчитанные сечения кабелей применяются при расчете ТКЗ, после которого рассчитываются сечения кабелей по термической стойкости к токам КЗ.

Результаты расчета КЛ, произведенные по вышеприведенным выражениям представлены в таблице 7.

Выводы по разделу.

В шестом разделе ВКР выбраны кабельные линии 0,4 кВ и 10 кВ предприятия.

## 7. Внешнее электроснабжение предприятия

### 7.1 Определение потерь электроэнергии в силовых трансформаторах ГПП

Потери электроэнергии в силовых трансформаторах ГПП могут быть вызваны несколькими факторами. Во-первых, это потери, связанные с магнитным потоком, который пронизывает железо в трансформаторе. Эти потери называются потерями железа и зависят от частоты тока, напряжения и конструкции трансформатора. Во-вторых, потери могут возникать из-за сопротивления обмоток трансформатора. Эти потери называются потерями меди и зависят от тока, который проходит через обмотки. Также могут возникать потери в трансформаторе из-за неполноты магнитной связи между обмотками. Эти потери называются потерями строгости магнитной связи и зависят от конструкции трансформатора. Все эти потери суммируются и образуют общие потери электроэнергии в трансформаторе. «Потери активной мощности» [28] в силовых трансформаторах ГПП:

$$\Delta P_{\text{т}} = n(\Delta P_{\text{xx}} + k_{\text{з.н.}}^2 \Delta P_{\text{кз}}), \quad (46)$$

где  $n$  – количество трансформаторов на ГПП комбината;

$\Delta P_{\text{xx}}$  – потери XX, кВт;

$\Delta P_{\text{кз}}$  – потери КЗ, кВт.

$$\Delta P_{\text{т.110}} = 2 \cdot (22 + 0,53^2 \cdot 120) = 117 \text{ кВт}.$$

Потери реактивной мощности в силовых трансформаторах ГПП:

$$\Delta Q_{\tau} = n \left( \frac{I_{xx}}{100} S_{н.т} + k_{з.н.}^2 \frac{U_{к}}{100} S_{н.т} \right), \quad (47)$$

где  $I_{xx}$  – ток XX силового трансформатора ГПП, %;

$U_{к}$  – напряжение КЗ силового трансформатора ГПП, %.

$$\Delta Q_{\tau} = 2 \cdot \left( \frac{0,3}{100} \cdot 25000 + 0,53^2 \cdot \frac{10,5}{100} \cdot 25000 \right) = 1793 \text{ квар.}$$

Потери электроэнергии в силовых трансформаторах:

$$\Delta A_{\tau} = n \left( \Delta P_{xx} \cdot T_{\Gamma} + k_{з.н.}^2 \cdot \Delta P_{кз} \cdot \tau \right), \quad (48)$$

где  $\tau$  – «годовое число часов максимальных потерь, ч/год» [28];

«Годовое число часов максимальных потерь определяется по выражению» [28]:

$$\tau = \left( 0,124 + \frac{T_{м}}{10^4} \right)^2 \cdot 8760, \quad (49)$$

где  $T_{м}$  – «годовое число часов использования получасового максимума активной нагрузки, ч/год» [28];

$$\tau = \left( 0,124 + \frac{4355}{10^4} \right)^2 \cdot 8760 = 2742 \frac{\text{ч}}{\text{год}}.$$

Тогда потери электрической энергии в трансформаторах составят

$$\Delta A_{\tau} = 2 \cdot \left( 22 \cdot 8760 + 0,53^2 \cdot 120 \cdot 2732 \right) = 622 \frac{\text{МВт} \cdot \text{ч}}{\text{год}}.$$

## 7.2 Расчет ЛЭП от подстанции энергосистемы до ГПП предприятия

«Нагрузка в начале ЛЭП» [29]:

$$S_{\text{р.л.}} = \sqrt{(P_{\text{р.п.}} + \Delta P_{\text{т}})^2 + Q_{\text{эс}}^2}, \quad (50)$$
$$S_{\text{р.л.}} = \sqrt{(24364 + 117)^2 + 12182^2} = 27345 \text{ кВА.}$$

«Расчетный ток одной цепи линии» [29]:

$$I_{\text{р.л.}} = \frac{S_{\text{р.л.}}}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot U_{\text{ном}}}, \quad (51)$$
$$I_{\text{р.л.}} = \frac{27345}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot 110} = 72 \text{ А.}$$

«Ток в послеаварийном режиме (в случае питания все нагрузки по одной цепи линии)» [29]:

$$I_{\text{п}} = 2 \cdot I_{\text{р.л.}}, \quad (52)$$
$$I_{\text{п}} = 2 \cdot 72 = 144 \text{ А.}$$

Экономическая плотность тока - это параметр, который используется для определения оптимального сечения провода в зависимости от стоимости электроэнергии и затрат на материалы. Он выражается как отношение стоимости провода к стоимости потерь энергии на единицу длины провода:

$$F_3 = \frac{I_{\text{р.л.}}}{j_3}, \quad (53)$$

где  $j_3$  – «экономическая плотность тока, А/мм<sup>2</sup>» [14].

$$F_3 = \frac{72}{1,1} = 65 \text{ мм}^2.$$

Принимается провод марки 3хАС–70/11 с  $r_0 = 0,43$  Ом/км.

«Потери активной энергии в проводах линии за год» [29]:

$$\Delta A_{л} = n \cdot (3 \cdot I_{p.л.}^2 \cdot r_0 \cdot L \cdot \tau); \quad (54)$$

где  $r_0$  – «удельное активное сопротивление ВЛ, Ом/км» [29];

$L$ –«расстояние от подстанции энергосистемы до ГПП, км» [29].

$$\Delta A_{л} = 2 \cdot (3 \cdot 72^2 \cdot 0,43 \cdot 12 \cdot 2742) = 437 \frac{\text{МВт} \cdot \text{ч}}{\text{год}}.$$

### 7.3 Расчет токов КЗ в сети ВН

Расчет токов короткого замыкания (ТКЗ) проводится для определения тока, который будет протекать при возникновении короткого замыкания в системе. Ток короткого замыкания — это ток, который протекает при замыкании фазных проводников между собой или на землю, и может достигать значительно больших значений, чем номинальный ток системы.

ТКЗ имеет большое значение при проектировании и эксплуатации электрических сетей, так как позволяет определить необходимые параметры защитных устройств и оборудования, а также оценить возможные последствия короткого замыкания на систему. «Исходная схема и схема замещения для расчёта ТКЗ представлена на рисунке 2» [30].

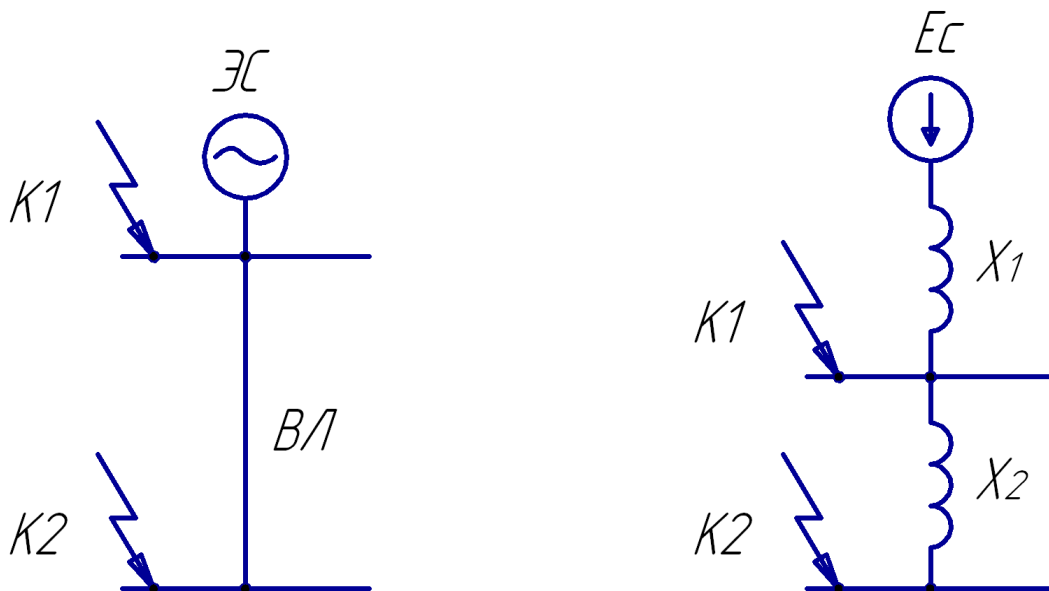


Рисунок 2 – Схема для расчёта ТКЗ

«Сопротивления элементов схемы замещения» [30] определяются по нижеприведенным формулам.

«Сопротивление системы» [18]:

$$x_1 = x_c = \frac{S_6}{S_k}, \quad (55)$$

где  $S_6$  – «базисная мощность, МВА» [18];

$S_k$  – «мощность КЗ, МВА» [18].

$$x_1 = x_c = \frac{1000}{3000} = 0,33.$$

«ТКЗв точке  $K_1$ » [18]:

$$I_{k1} = I_{nt1} = I_{n01} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6 \cdot x_1}, \quad (56)$$

$$I_{k1} = I_{nt1} = I_{n01} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115 \cdot 0,33} = 15,1 \text{ кА.}$$

«Ударный ТКЗв точке 1» [18]:

$$i_{уд1} = \sqrt{2} \cdot k_{уд1} \cdot I_{k1}, \quad (57)$$

где  $k_{уд}$  – ударный коэффициент [18].

$$i_{уд1} = \sqrt{2} \cdot 1,72 \cdot 15,1 = 36,6 \text{ кА.}$$

«Сопротивление воздушной линии» [18]:

$$x_2 = \frac{x_0 \cdot L \cdot S_6}{U_6^2}, \quad (58)$$

где  $x_0$  – «удельное реактивное сопротивление ВЛ, Ом/км» [18];

$U_6$  – «базисное напряжение, В» [18].

$$x_2 = \frac{0,41 \cdot 12 \cdot 1000}{115^2} = 0,40.$$

ТКЗв точке  $K_2$

$$I_{k2} = I_{пт2} = I_{н02} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6 \cdot (x_1 + x_2)}, \quad (59)$$

$$I_{k2} = I_{пт2} = I_{н02} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115 \cdot (0,33 + 0,40)} = 6,9 \text{ кА.}$$

#### **7.4 Выбор коммутационной и измерительной аппаратуры**

Выбор выключателей и разъединителей для ГПП завода осуществляется на основе требований к электробезопасности и

электрическим параметрам электрических цепей.

Выключатели и разъединители — это электроустановочные устройства, предназначенные для отключения электрических цепей. Они могут использоваться как для обычного включения и отключения оборудования, так и для аварийного отключения в случае необходимости.

При выборе выключателей следует учитывать следующие факторы [31]:

– по номинальному напряжению

$$U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}} ; \quad (60)$$

– по номинальному току

$$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{max}} ; \quad (61)$$

где  $I_{\text{max}}$  – «ток утяжеленного режима цепей питающих линий, А» [31].

«Ток утяжеленного режима цепей питающих» [31]КЛ:

$$I_{\text{max}} = \frac{1,4 \cdot S_{\text{H}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{H}}} ; \quad (62)$$

– по категории применения. Для каждого типа устройства указывается его категория применения, которая определяет условия работы и надежность;

– по отключающей способности

$$I_{\text{п,т}} \leq I_{\text{отк.ном}} ; \quad (63)$$

– по механическим характеристикам. Выключатели должны иметь необходимые механические характеристики, такие как прочность, износостойкость, влагозащиту и т.д.



– по электродинамической стойкости

$$I_{п,0} < I_{пр.скв.} = I_{дин.}, \quad (64)$$

$$i_y \leq i_{пр.скв.} = i_{дин.}; \quad (65)$$

где  $I_{пр.скв.}$ ,  $i_{пр.скв.}$  – «действующее и амплитудное значения предельного сквозного тока» [31] КЗ, А;

– «по возможности отключения апериодической составляющей тока КЗ  $i_{а,τ}$  в момент  $τ$  расхождения контактов по условию» [31]:

$$i_{а,τ} \leq i_{а,ном}; \quad (66)$$

«Апериодическая составляющая тока КЗ вычисляется как» [31]:

$$i_{а,τ} = \sqrt{2} \cdot I_{п,0} \cdot e^{-\frac{τ}{T_a}}, \quad (67)$$

где  $τ$  – «период времени от начала короткого замыкания до прекращения соприкосновения контактов, с» [31];

$T_a$  – «постоянная времени затухания апериодической составляющей КЗ» [31].

«Расчетное время» [31]:

$$τ = t_{рз.мин} + t_{с.в.}, \quad (68)$$

где  $t_{рз.мин}$  – минимальное время действия РЗ, с;

$t_{с.в.}$  – собственное время отключения выключателя, с.

«Завод–изготовитель» [5], [6] «гарантирует выключателю апериодическую составляющую в отключаемом токе для времени  $τ$ » [31]:

$$i_{a,ном} = \sqrt{2} \cdot \beta_n \cdot I_{отк,ном}, \quad (69)$$

– «по термической стойкости к тепловому импульсу тока короткого замыкания» [31]:

$$W_k \leq I_{тер}^2 \cdot t_{тер}, \quad (70)$$

где  $W_k$  – полный тепловой импульс КЗ,  $кА^2 \cdot с$ .

Полный тепловой импульс определяется по формуле:

$$W_k = I_{п,0}^2 \cdot (t_{отк} + T_a), \quad (71)$$

где  $t_{отк}$  – время от момента возникновения КЗ до времени его отключения, с.

Время от момента возникновения КЗ до его отключения

$$t_{отк} = t_{р.з.} + t_{о.в.}, \quad (72)$$

где  $t_{р.з.}$  – «время действия основной релейной защиты силового трансформатора, с» [31];

$t_{о.в.}$  – «полное время отключения выключателя, с» [31].

Также при выборе выключателей необходимо учитывать размеры и монтажные параметры, так как выключатели должны соответствовать требуемым размерам и монтажным параметрам, чтобы удобно устанавливаться в электрические шкафы и коробки.

«Сравнение расчетных величин и каталожных данных» [5], [6] выбранных выключателей представлены в таблице 8.

Таблица 8–Выбор выключателей

| Условия выбора  | Расчетные данные                                   | Каталожные данные  |
|---|--|--|
| $U_{\text{ном}} \geq U_{\text{уст}}$                      | $U_{\text{уст}} = 110,0 \text{ кВ}$                | $U_{\text{ном}} = 110,0 \text{ кВ}$  |
| $I_{\text{ном}} \geq I_{\text{мах}}$                      | $I_{\text{мах}} = 183,7 \text{ А}$                 | $I_{\text{ном}} = 1250,0 \text{ А}$  |
| $I_{\text{отк.ном}} \geq I_{\text{п,т}}$                  | $I_{\text{п,0}} = 15,1 \text{ кА}$                 | $I_{\text{отк}} = 40,0 \text{ кА}$   |
| $i_{\text{а,ном}} \geq i_{\text{а,т}}$                    | $i_{\text{а,т}} = 7,0 \text{ кА}$                  | $i_{\text{а,ном}} = 22,6 \text{ кА}$                                       |
| $I_{\text{пр.скв.}} \geq I_{\text{п,0}}$                  | $I_{\text{п,0}} = 15,1 \text{ кА}$                 | $I_{\text{пр.скв}} = 40,0 \text{ кА}$                                      |
| $i_{\text{пр.скв.}} \geq i_{\text{дин.}}$                 | $i_{\text{у}} = 36,6 \text{ кА}$                   | $i_{\text{у}} = 102,0 \text{ кА}$  |
| $I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} \geq B_{\text{к}}$ | $B_{\text{к}} = 428,7 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ | $I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} = 4800 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ |

«Разъединители выбираются, согласно условиям» [31]:

– «по номинальному напряжению» [31]:

$$U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}} ; \quad (73)$$

– «по номинальному току» [31]:

$$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{мах}} ; \quad (74)$$

– «по электродинамической стойкости» [31]:

$$I_{\text{п,0}} < I_{\text{пр.скв.}} = I_{\text{дин.}} , \quad (75)$$

$$i_{\text{у}} \leq i_{\text{пр.скв.}} = i_{\text{дин.}} ; \quad (76)$$

– «по термической стойкости» [31]:

$$B_{\text{к}} \leq I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} . \quad (77)$$

«Сравнение расчетных величин и каталожных данных [15] выбранных разъединителей представлены в таблице 9.

Таблица 9–Выбор разъединителей

| Условия выбора  | Расчетные данные                                   | Каталожные данные  |
|---|--|--|
| $U_{\text{ном}} \geq U_{\text{уст}}$                      | $U_{\text{уст}} = 110,0 \text{ кВ}$                | $U_{\text{ном}} = 110 \text{ кВ}$  |
| $I_{\text{ном}} \geq I_{\text{мах}}$                      | $I_{\text{мах}} = 183,7 \text{ А}$                 | $I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$  |
| $i_{\text{пр.скв.}} \geq i_{\text{дин.}}$                 | $i_{\text{y}} = 36,6 \text{ кА}$                   | $i_{\text{y}} = 100 \text{ кА}$  |
| $I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} \geq B_{\text{k}}$ | $B_{\text{k}} = 428,7 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ | $I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} = 4800 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ |

«С целью учета потерь электроэнергии в силовых трансформаторах ГПП предприятия принимается решение установить приборы учета на стороне ВН. Счетчики электроэнергии подключаются ко вторичным обмоткам трансформаторов тока и трансформатора напряжения» [31].

Выбор измерительных трансформаторов напряжения (ИТН) зависит от многих факторов, включая требуемый диапазон измеряемых значений напряжения, точность измерения, тип и характеристики электрооборудования, с которым ИТН будет использоваться, и другие факторы. Важно выбирать ИТН, которые имеют достаточную точность для требуемых измерений, а также обеспечивают необходимый уровень безопасности и защиты. В ГПП группы цехов промышленного предприятия ЗАО «Народное предприятие Набережно–Челнинский картонно–бумажный комбинат им. С.П. Титова» принимаются трансформаторы напряжения и ЗНОГ–110У1 [24].

Для защиты оборудования ГПП предприятия от перенапряжений выбираются ограничители перенапряжения в соответствии с параметрами электросети и защищаемым оборудованием. В данном случае, выбираются следующие ограничители перенапряжения:

- ОПН-35/40,5, предназначен для защиты оборудования на линиях напряжением до 35 кВ с номинальным током до 40,5 кА. Этот ограничитель имеет номинальное напряжение 35 кВ и максимальную токоотводящую способность 40,5 кА;

- ОПН-110/56, предназначен для защиты оборудования на линиях напряжением до 110 кВ с номинальным током до 56 кА. Этот ограничитель

имеет номинальное напряжение 110 кВ и максимальную токоотводящую способность 56 кА;

– ОПН-110/88, предназначен для защиты оборудования на линиях напряжением до 110 кВ с номинальным током до 88 кА. Этот ограничитель имеет номинальное напряжение 110 кВ и максимальную токоотводящую способность 88 кА [12].

Выводы по разделу.

В седьмом разделе ВКР проведен расчет внешнего электроснабжения предприятия. Определены потери электроэнергии в силовых трансформаторах ГПП. Выполнен расчет линии электропередач от ПС энергосистемы до ГПП предприятия. Выполнен расчет ТКЗ в сети высшего напряжения. Выбрана коммутационная и измерительная аппаратура.

## 8 Расчет токов короткого замыкания

Схема для расчёта ТКЗ показана на рисунке 3.

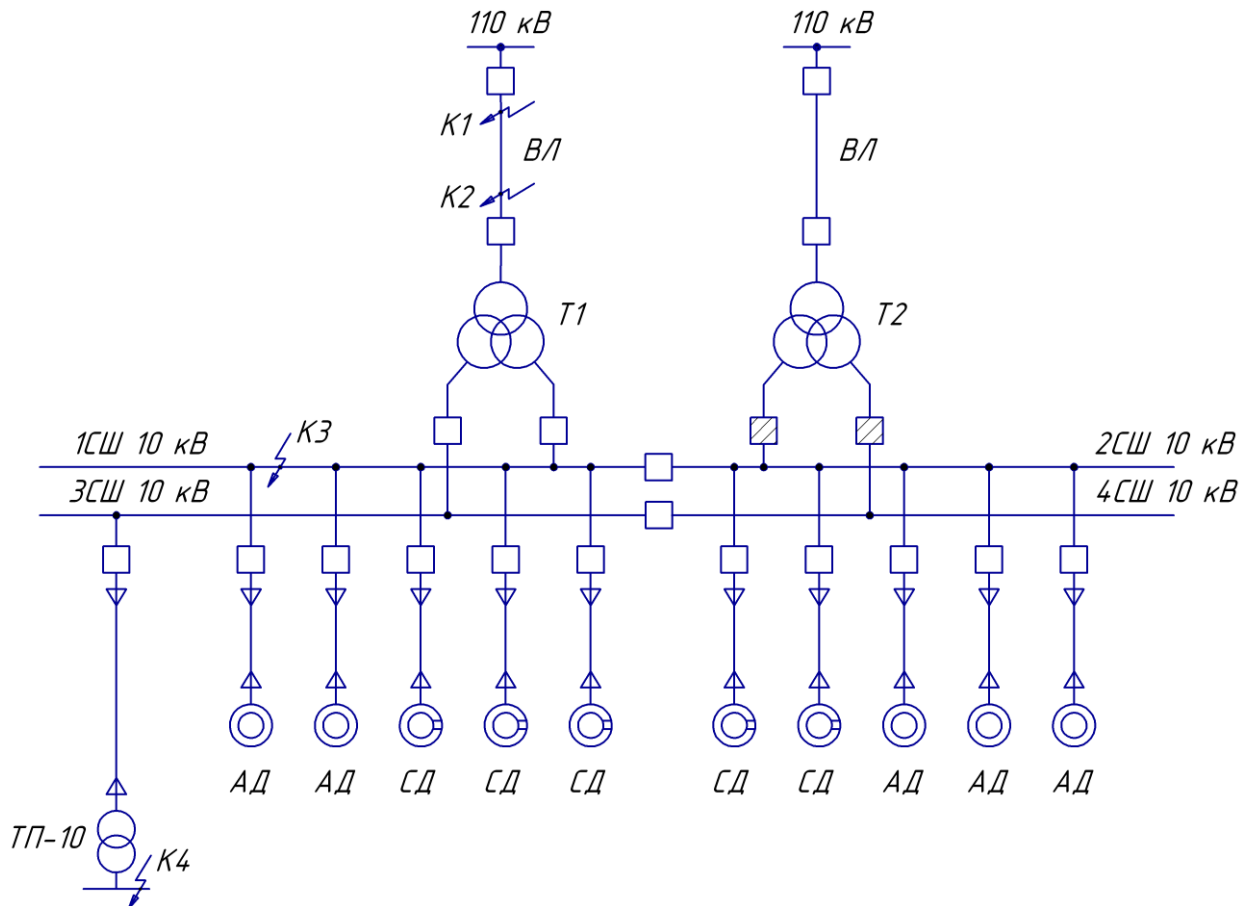


Рисунок 3– Схема для расчета ТКЗ

«Расчёт токов КЗ производится в следующих точках:

- $K_1$  и  $K_2$  – в системе внешнего электроснабжения;
- $K_3$  – в распределительном устройстве 10 кВ ГПП комбината;
- $K_4$  – в сети напряжением 0,4 кВ (на стороне 0,4 кВ цеховых ТП)» [27].

«При расчете ТКЗ в точках  $K_1$  и  $K_2$  подпитка от синхронных электродвигателей не учитывается. В подпитке точки  $K_3$  участвуют высоковольтные двигатели, подключенные только к обеим секциям. При расчете тока короткого замыкания в точке  $K_4$  в качестве источника учитывается только энергетическая система, а подпитку от электрических двигателей напряжением 10 кВ не учитывают» [27].

«Для определения ТКЗ по схеме электроснабжения комбината (рисунок 5) необходимо составить схему замещения (рисунок 4)» [27].

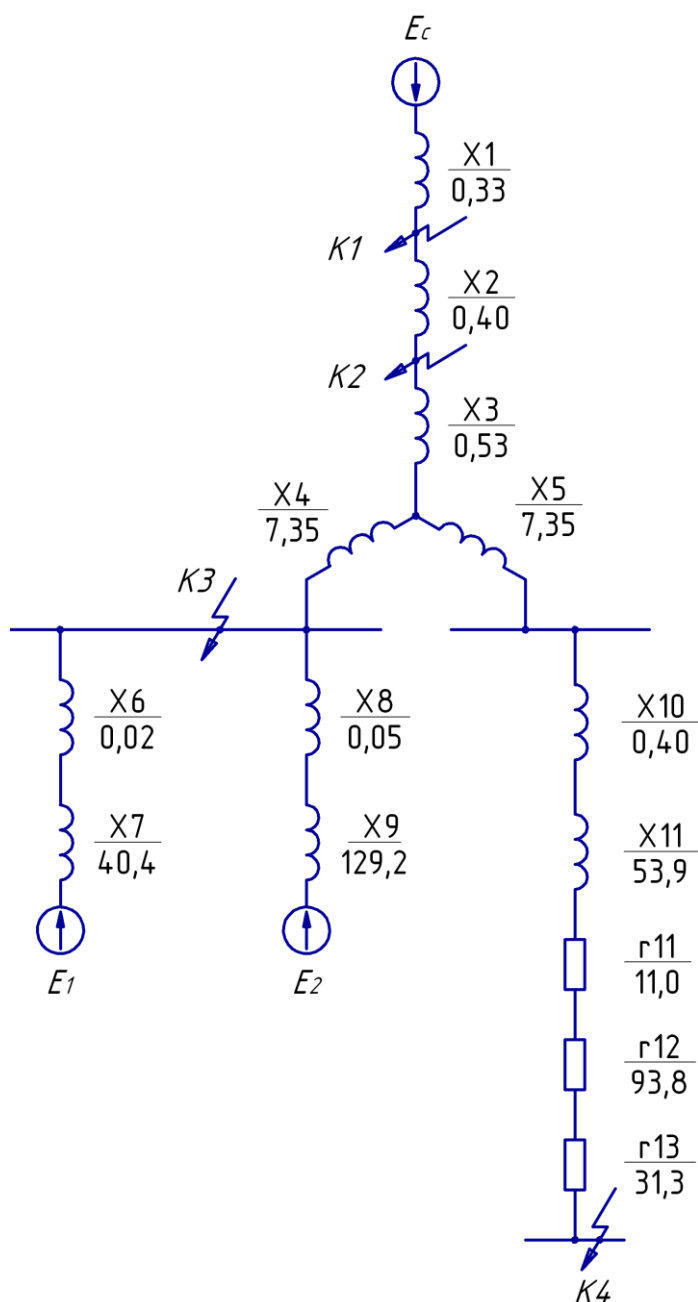


Рисунок 4– Схема замещения для расчета токов КЗ

«Далее необходимо определить параметры схемы замещения в относительных единицах при  $S_6 = 1000$  МВА. При этом за базисное напряжение принимается напряжение той ступени, на которой произошло КЗ» [27].

«Сопротивление энергосистемы» [18]:

$$x_1 = x_c = \frac{S_6}{S_c}, \quad (78)$$

где  $S_c$  – «мощность КЗ на шинах энергосистемы, МВА» [18].

$$x_1 = x_c = \frac{1000}{3000} = 0,33.$$

Сопротивление ВЛ

$$x_2 = x_l = x_{0\text{вл}} \cdot L_{\text{вл}} \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср1}}^2}, \quad (79)$$

где  $U_{\text{ср1}}$  – «среднее напряжение питающей ВЛ» [27], кВ;

$L_{\text{вл}}$  – протяженность воздушной линии 110 кВ, км;

$x_{0\text{вл}}$  – «удельное реактивное сопротивление ВЛ» [27] 110 кВ, Ом/км;

$S_6$  – базисная мощность, МВА.

$$x_2 = x_l = 0,43 \cdot 12 \cdot \frac{1000}{115^2} = 0,40.$$

Сопротивление силового трансформатора ГПП комбината определяется по формуле

$$x_T = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{н.т}}}, \quad (80)$$

где  $U_k$  – напряжение КЗ силового трансформатора ГПП комбината;

$S_{\text{н.т.}}$  – номинальная мощность силового трансформатора ГПП комбината, кВА.



$$x_T = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{1000}{25} = 4,20.$$

Сопротивление обмотки ВН

$$x_3 = 0,125 \cdot x_T, \quad (81)$$

$$x_3 = 0,125 \cdot 4,2 = 0,53.$$

Сопротивление обмоток НН

$$x_4 = x_5 = 1,75 \cdot x_T, \quad (82)$$

$$x_4 = x_5 = 1,75 \cdot 4,2 = 7,35.$$

Сопротивление кабельной линии

$$x_{\text{кл}} = \frac{1}{n_{\text{кл}}} \cdot x_{0\text{кл}} \cdot L_{\text{кл}} \cdot \frac{S_6}{U_{\text{cp2}}^2}, \quad (83)$$

где  $n_{\text{кл}}$  – «число запараллеленных кабельных линий, шт» [27];

$x_{0\text{кл}}$  – «удельное реактивное сопротивление КЛ, Ом/км» [27];

$L_{\text{кл}}$  – «длина КЛ, км» [27];

$U_{\text{cp2}}$  – «среднее напряжение кабельной линии, кВ» [27].

$$x_6 = \frac{1}{1} \cdot 0,14 \cdot 0,085 \cdot \frac{1000}{10,5^2} = 0,02,$$

$$x_8 = \frac{1}{1} \cdot 0,14 \cdot 0,192 \cdot \frac{1000}{10,5^2} = 0,05,$$

$$x_{10} = \frac{1}{1} \cdot 0,14 \cdot 0,314 \cdot \frac{1000}{10,5^2} = 0,40.$$

Сопротивление СД:

$$x_d = \frac{1}{n_d} \cdot \frac{1}{I_{\text{пуск}}} \cdot \frac{S_6 \cdot \cos \varphi \cdot \eta}{P_d}, \quad (84)$$

где  $I_{\text{пуск}}$  – «кратность пускового тока двигателя» [27];

$P_d$  – «номинальная активная мощность двигателя, кВт» [27].

$$x_7 = \frac{1}{5} \cdot \frac{1}{5} \cdot \frac{1000 \cdot 10^3 \cdot 0,85 \cdot 0,9}{800} = 40,4,$$

$$x_9 = \frac{1}{5} \cdot \frac{1}{5} \cdot \frac{1000 \cdot 10^3 \cdot 0,85 \cdot 0,9}{250} = 129,2.$$

В электросети напряжением ниже 1000 В следует учитывать активные сопротивления. Полное сопротивление силового трансформатора определяется по формуле [32]:

$$z_T = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{н.т}}}, \quad (85)$$

где  $U_k$  – напряжение КЗ силового трансформатора ЦТП, %;

$S_{\text{н.т}}$  – номинальная мощность силового трансформатора ЦТП, ВА.

$$z_{11} = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{1000 \cdot 10^3}{1000} = 55,0. \quad (86)$$

Активное сопротивление силового трансформатора определяется по формуле:

$$r_T = \Delta P_k \cdot \frac{S_6}{S_{\text{н.т}}^2}, \quad (87)$$

где  $\Delta P_k$  – потери КЗ силового трансформатора ЦТП, Вт.

$$r_{11} = 11,0 \cdot \frac{1000}{1000^2} = 11,0.$$

Индуктивное сопротивление силового трансформатора определяется по формуле

$$x_r = \sqrt{z_r^2 - r_r^2}, \quad (88)$$

$$x_{11} = \sqrt{55,0^2 - 11,0^2} = 53,9.$$

«Для РУ цеховых ТП переходное сопротивление контактов можно принять  $r_k = 0,015$  Ом, тогда» [18]:

$$r_{12} = r_k \cdot \frac{S_6}{U_6^2}, \quad (89)$$

$$r_{12} = 0,015 \cdot \frac{1000}{0,4^2} = 93,8.$$

«Активное сопротивление дуги в месте КЗ» [18]:

$$r_{13} = r_d \cdot \frac{S_6}{U_6^2}, \quad (90)$$

$$r_{13} = 0,005 \cdot \frac{1000}{0,4^2} = 31,3.$$

«Для расчета ТКЗ в точке К<sub>3</sub> необходимо привести схему замещения (рисунок 4) к виду рисунка 5. Сопротивления элементов, представленных на схеме замещения, изображенной на рисунке 7, определяются по выражениям» [27]:

$$x_{14} = x_1 + x_2 + x_3 + x_4, \quad (91)$$

$$x_{15} = x_6 + x_7, \quad (92)$$

$$x_{16} = x_8 + x_9. \quad (93)$$

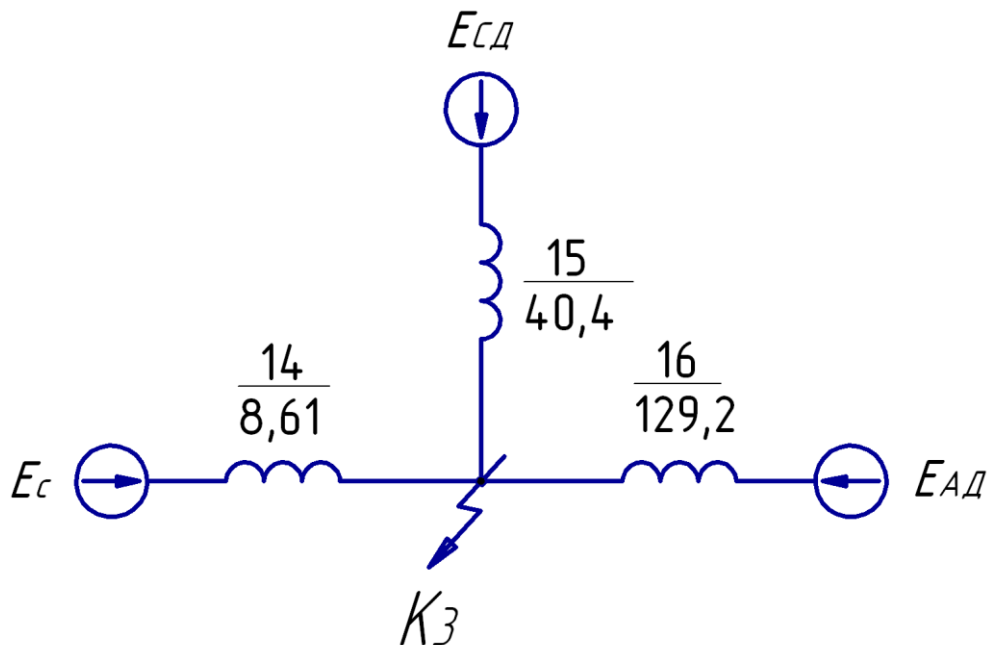


Рисунок 5– Схема замещения для расчета КЗ в точке К<sub>3</sub>

$$x_{14} = 0,33 + 0,40 + 0,53 + 7,35 = 8,61,$$

$$x_{15} = 0,02 + 40,4 = 40,5,$$

$$x_{16} = 129,2 + 0,05 = 129,2.$$

«Базисный ток» [18]:

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6}, \quad (94)$$

$$I_6 = \frac{1000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 55 \text{ кА}.$$

«Начальные значения сверхпереходного тока каждой ветви определяются по выражению» [27]:

$$I_c = \frac{E_c}{X_{14}} \cdot I_a, \quad (95)$$

$$I_{CD} = \frac{E_1}{X_{15}} \cdot I_6, \quad (96)$$

$$I_{AD} = \frac{E_1}{X_{16}} \cdot I_6, \quad (97)$$

$$I_c = \frac{1}{8,61} \cdot 55 = 6,4 \text{ кА},$$

$$I_{AD} = \frac{0,9}{129,2} \cdot 55 = 0,4 \text{ кА},$$

$$I_{CD} = \frac{1,1}{40,4} \cdot 55 = 1,5 \text{ кА}.$$

«Начальное значение ТКЗ в точке К<sub>3</sub> определяется как» [27]:

$$I_{кз3/0/} = I_c + I_{CD} + I_{AD}, \quad (98)$$

$$I_{кз3/0/} = 6,4 + 1,5 + 0,4 = 8,3 \text{ кА}.$$

«Ударный ток КЗ определяется по выражению» [27]:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_k, \quad (99)$$

где  $k_{уд}$  – ударный коэффициент [21].

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot 1,92 \cdot 8,3 = 22,2 \text{ кА}.$$

Мощность КЗ в точке К<sub>3</sub> определяется по выражению

$$S_{кз3} = \sqrt{3} \cdot U_6 \cdot I_k, \quad (100)$$

$$S_{кз3} = \sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 8,3 = 150 \text{ МВА}.$$

«Определение тока КЗ в точке К<sub>4</sub>» [27].

«Суммарное активное сопротивление определяется как» [27]:

$$\begin{aligned}r_{\Sigma} &= r_{11} + r_{12} + r_{13}, \\r_{\Sigma} &= 11,0 + 93,8 + 31,3 = 105,7.\end{aligned}\tag{101}$$

«Суммарное индуктивное сопротивление» [27]:

$$\begin{aligned}x_{\Sigma} &= x_{10} + x_{11} + x_{14}, \\x_{\Sigma} &= 0,40 + 53,9 + 8,61 = 62,9.\end{aligned}\tag{102}$$

«Полное сопротивление» [27]:

$$\begin{aligned}z_{\Sigma} &= \sqrt{r_{\Sigma}^2 + x_{\Sigma}^2}, \\z_{\Sigma} &= \sqrt{105,7^2 + 62,9^2} = 123,0.\end{aligned}\tag{103}$$

«Мощность КЗ в точке К<sub>4</sub> определяется по выражению» [27]:

$$\begin{aligned}S_{\text{кз4}} &= \frac{S_{\delta}}{z_4}, \\S_{\text{кз4}} &= \frac{1000}{123,0} = 8,1 \text{ МВА}.\end{aligned}\tag{104}$$

Ток КЗ при базисном напряжении  $U_{\delta} = 0,4 \text{ кВ}$  определяется по выражению

$$I_{\text{к4}} = \frac{S_{\text{к4}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta}},\tag{105}$$

$$I_{k4} = \frac{8,1}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 11,7 \text{ кА.}$$

Ударный ток КЗ в точке К<sub>4</sub> определяется по выражению

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_k, \quad (106)$$

где  $k_y$  – ударный коэффициент [21].

$$i_{уд4} = \sqrt{2} \cdot 1,6 \cdot 11,7 = 26,6 \text{ кА.}$$

Выводы по разделу.

В восьмом разделе проведен расчет токов КЗ в сети внутривозовского электроснабжения.

## 9 Выбор аппаратов и токоведущих частей

### 9.1 Выбор ячеек КРУ ГПП

«Перед выбором и проверкой коммутационной и измерительной аппаратуры осуществляется выбор комплектного оборудования СЭС» [8].

«Распределительное устройство РУ 10 кВ выполняется комплектным (КРУ) со шкафами типа К–104М.

Тип выключателя для данных ячеек ВВЭ–10У, тип трансформаторов тока ТЛК» [10].

«Рабочий ток в утяжеленном режиме вводной ячейки определяется с учетом перегрузочной способности трансформаторов ГПП» [8]:

$$I_{\max} = \frac{1,4 \cdot S_{н.т.}}{\sqrt{3} \cdot U_{н.} \cdot 2}, \quad (107)$$
$$I_{\max} = \frac{1,4 \cdot 25000}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 2} = 962,3 \text{ А.}$$

Тепловой импульс ТКЗ можно определить как:

$$B_k = I_{н,0}^2 \cdot (t_{п.з.} + t_{о.в.} + T_a), \quad (108)$$

где  $t_{п.з.}$  – время действия МТЗ линии, с;

$t_{о.в.}$  – «полное время отключения выключателя, с» [27];

$T_a$  – «время протекания апериодической составляющей ТКЗ, с» [27].

$$B_k = 8,3^2 \cdot (1,7 + 0,06 + 0,12) = 174,4 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

«Условия выбора, расчетные параметры электросети и каталожные данные ячеек КРУ сведены в таблицу 10» [10].



Таблица 10–Выбор КРУ

| Условия выбора  | Расчетные параметры сети                           | Каталожные данные К–104М   |
|---|--|--|
| $U_{\text{ном}} \geq U_{\text{уст}}$                      | $U_{\text{уст}} = 10,5 \text{ кВ}$                 | $U_{\text{ном}} = 10,5 \text{ кВ}$   |
| $I_{\text{ном}} \geq I_{\text{мах}}$                      | $I_{\text{мах}} = 962,3 \text{ А}$                 | $I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$  |
| $i_{\text{д}} \geq i_{\text{у}}$                          | $i_{\text{у}} = 22,8 \text{ кА}$                   | $i_{\text{д}} = 81,0 \text{ кА}$   |
| $I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} \geq B_{\text{к}}$ | $B_{\text{к}} = 128,5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ | $I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} = 1200 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ |

Условия выполняются, КРУ соответствует заявленным расчетам.

## 9.2 Выбор выключателей КРУ

«Подробный выбор выключателя на вводной ячейке 10 кВ приведен в таблице 11. Секционный выключатель выбирается того же типа, что и вводной выключатель» [22].

«В ячейках КРУ типа К–104М устанавливаются вакуумные выключатели марки ВВЭ–10–20/1000 У3» [4].

«Сравнение расчетных и паспортных данных для выбранных выключателей на вводе в КРУ представлено в таблице 11» [4].

Таблица 11–Выбор выключателей на вводе в КРУ

| Условия выбора  | Расчетные параметры сети                           | «Каталожные данные ВВЭ–10–20/1000 У3» [4]                                  |
|---|--|--|
| $U_{\text{ном}} \geq U_{\text{уст}}$                      | $U_{\text{уст}} = 10,5 \text{ кВ}$                 | $U_{\text{ном}} = 10,5 \text{ кВ}$   |
| $I_{\text{ном}} \geq I_{\text{мах}}$                      | $I_{\text{мах}} = 962,3 \text{ А}$                 | $I_{\text{ном}} = 1000,0 \text{ А}$  |
| $I_{\text{ном.отк}} \geq I_{\text{п,0}}$                  | $I_{\text{п,0}} = 8,3 \text{ кА}$                  | $I_{\text{ном.отк}} = 20,0 \text{ кА}$                                     |
| $i_{\text{ном}} \geq i_{\text{а,т}}$                      | $i_{\text{а,т}} = 3,4 \text{ кА}$                  | $i_{\text{а,ном.}} = 14,0 \text{ кА};$                                     |
| $I_{\text{дин.}} \geq I_{\text{п,0}}$                     | $I_{\text{п,0}} = 8,3 \text{ кА}$                  | $I_{\text{дин.}} = 20,0 \text{ кА}$  |
| $i_{\text{дин.}} \geq i_{\text{у}}$                       | $i_{\text{у}} = 22,2 \text{ кА}$                   | $i_{\text{у}} = 81,0 \text{ кА}$   |
| $I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} \geq B_{\text{к}}$ | $B_{\text{к}} = 128,5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ | $I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} = 1200 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ |

Параметры вакуумных выключателей полностью удовлетворяют условия выбора, по расчётам параметров сети.

### 9.3 Выбор трансформаторов тока в ячейках КРУ

Выбор трансформаторов тока для ячеек КРУ (комплектных распределительных устройств) осуществляется с учетом нескольких факторов, включая номинальный ток ячейки, характеристики оборудования, габариты и требования по точности измерения тока.

Основным параметром, определяющим выбор трансформаторов тока, является номинальный ток ячейки. Трансформаторы тока должны быть выбраны таким образом, чтобы их номинальный ток соответствовал номинальному току ячейки. Также необходимо учитывать возможность дополнительной нагрузки, которая может возникнуть в будущем.

«В ячейках КРУ типа К–104М устанавливаются трансформаторы тока типа ТЛК–10–1000–0,5/10Р–У3» [7]. «Трансформатор тока в цепи секционного выключателя принимается того же типа. Условия выбора, расчетные параметры сети и каталожные данные трансформаторов тока на вводе в КРУ указаны в таблице 12» [7].

Таблица 12–Выбор трансформаторов тока на вводе в КРУ ГПП

| Условия выбора  | Расчетные параметры сети                           | Каталожные данные<br>ТЛК–10–1000–0,5/10Р–У3                                  |
|---|--|--|
| $U_{\text{ном}} \geq U_{\text{уст}}$                      | $U_{\text{уст}} = 10,5 \text{ кВ}$                 | $U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$   |
| $I_{\text{ном}} \geq I_{\text{max}}$                      | $I_{\text{max}} = 962,3 \text{ А}$                 | $I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$  |
| $i_{\text{д}} \geq i_{\text{y}}$                          | $i_{\text{y}} = 22,2 \text{ кА}$                   | $i_{\text{y}} = 81,0 \text{ кА}$   |
| $I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} \geq B_{\text{k}}$ | $B_{\text{k}} = 128,5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ | $I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} = 1200,0 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ |

«Для проверки выбранного трансформатора тока по вторичной нагрузке составляется схема включения трансформаторов тока и измерительных приборов, представленная на рисунке б» [27].

«В цепи устанавливаются следующие измерительные приборы: амперметр, ваттметр, счетчики активной и реактивной энергии, включенные по схеме неполной звезды» [27].

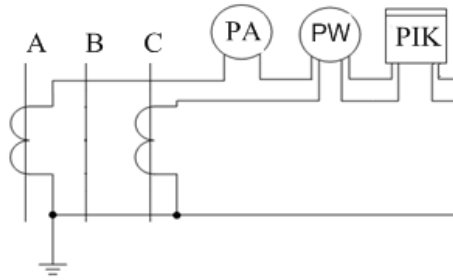


Рисунок 6– Схема включения приборов в неполную звезду

«Сопротивление приборов» [27]:

$$r_{\text{приб}} = \frac{S_{\text{приб}}}{I_2^2}, \quad (109)$$

$$r_{\text{приб}} = \frac{1,1}{5^2} = 0,04 \text{ Ом.}$$

«Допустимое сопротивление проводов» [27]:

$$r_{\text{пр}} = Z_{2\text{ном}} - r_{\text{приб}} - r_{\text{к}}, \quad (110)$$

где  $r_{\text{к}}$ —«сопротивление контактов, Ом» [27];

$Z_{2\text{ном}}$ —«вторичная номинальная нагрузка, Ом» [27].

$$r_{\text{пр}} = 0,4 - 0,04 - 0,1 = 0,26 \text{ Ом.}$$

«Сечение соединительных проводов при соединении в неполную звезду» [27]:

$$q = \frac{\rho \cdot L_{\text{расч}}}{r_{\text{пр}}}, \quad (111)$$

$$q = \frac{0,0283 \cdot \sqrt{3} \cdot 4}{0,26} = 0,8 \text{ мм}^2.$$

«Выбор выключателей и трансформаторов тока, устанавливаемых в ячейках отходящих линий, представлен в таблице 13» [27].

Таблица 13–Выбор выключателей и трансформаторов тока

| Кабельные линии | U <sub>ном</sub> , кВ | I <sub>max</sub> , А | I <sub>r,0</sub> , кА | i <sub>y</sub> , кА | Тип выключателя  | Тип трансформатора тока |
|-----------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|------------------|-------------------------|
| ГПП – ТП-1      | 10,5                  | 168                  | 8,3                   | 22,2                | ВВЭ-10-20/630 У3 | ТЛК-10-200 У3           |
| ТП-1 – ТП-2     | 10,5                  | 84                   |                       |                     |                  | ТЛК-10-100 У3           |
| ГПП – ТП-3      | 10,5                  | 168                  |                       |                     |                  | ТЛК-10-150 У3           |
| ТП-3 – ТП-4     | 10,5                  | 84                   |                       |                     |                  | ТЛК-10-100 У3           |
| ГПП – ТП-5      | 10,5                  | 213                  |                       |                     |                  | ТЛК-10-300 У3           |
| ГПП – ТП-6      | 10,5                  | 213                  |                       |                     |                  | ТЛК-10-300 У3           |
| ГПП – ТП-7      | 10,5                  | 254                  |                       |                     |                  | ТЛК-10-300 У3           |
| ТП-7 – ТП-8     | 10,5                  | 169                  |                       |                     |                  | ТЛК-10-200 У3           |
| ТП-8 – ТП-9     | 10,5                  | 77                   |                       |                     |                  | ТЛК-10-100 У3           |
| ГПП – ТП-10     | 10,5                  | 62                   |                       |                     |                  | ТЛК-10-100 У3           |
| ГПП – ТП-11     | 10,5                  | 77                   |                       |                     |                  | ТЛК-10-100 У3           |
| ГПП – ТП-12     | 10,5                  | 191                  |                       |                     |                  | ТЛК-10-200 У3           |
| ГПП – СД        | 10,5                  | 35                   |                       |                     |                  | ТЛК-10-50 У3            |
| ГПП – РКЗ       | 10,5                  | 109                  |                       |                     |                  | ТЛК-10-150 У3           |
| ГПП – ЭПТМ      | 10,5                  | 56                   |                       |                     |                  | ТЛК-10-75 У3            |
| ГПП – АД        | 10,5                  | 12                   |                       |                     |                  | ТЛК-10-20 У3            |

Точность измерения тока – это еще один важный фактор, который необходимо учитывать при выборе трансформаторов тока. Точность трансформаторов тока должна быть достаточной для обеспечения требуемой точности измерения тока в ячейке.

#### 9.4 Выбор трансформаторов напряжения

«Трансформатор напряжения необходимо устанавливать один на каждую секцию сборных шин. Ко вторичной обмотке трансформатора напряжения подключаются катушки напряжения измерительных приборов

всех присоединений секции сборных шин, на которую он устанавливается» [27].

«В ячейках типа К–104М к установке принимается трансформатор напряжения типа НАЛИ–СЭЩ–10, так как данный трансформатор напряжения обладает определенными преимуществами перед аналогичными антирезонансными трансформаторами напряжения [25].

«Трансформаторы напряжения выбираются следует выбирать по» [27]:  
– «по напряжению» [27]:

$$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{уст}} ; \quad (112)$$

– «по конструкции и схеме соединения обмоток» [27];  
– «по классу точности» [27].

«Для того, чтобы трансформатор напряжения работал в заданном классе точности, необходимо выполнение следующего условия» [27]:

$$S_{2\text{ном}} \geq S_{\text{нагр}} ; (113)$$

где  $S_{\text{нагр}}$  – «мощность всех измерительных приборов и реле, подключенных к трансформатору напряжения, ВА» [27];

$S_{2\text{ном}}$  – «величина номинальной мощности вторичной обмотки трансформатора напряжения в заданном классе точности, ВА» [27].

Трансформатор напряжения подключается к СШ через предохранитель марки ПKN001–10У3и втычной разъединитель.

## **9.5 Проверка кабелей напряжением 10 кВ на термическую стойкость к ТКЗ**

Данная проверка проводится с целью установления, насколько кабели

способны выдержать тепловое воздействие, возникающее при коротком замыкании. Это важно для обеспечения безопасной и надежной работы кабелей и предотвращения возможных аварийных ситуаций. «Расчет всех характерных термических сечений кабелей сведен в таблицу 14» [27].

Термически стойкое сечение (ТСС) — это наибольшее сечение провода или кабеля, которое может выдержать заданную температуру без дополнительного нагрева и сохранять свои электрические свойства при этом.

Значение ТСС зависит от многих факторов, таких как материал проводника, температура окружающей среды, метод укладки кабеля, скорость распространения тепла и другие.

Обычно, при расчете ТСС учитываются тепловые свойства материала проводника, температурный режим работы, группа токопередачи и допустимые потери мощности [26].

ТСС важно учитывать при выборе проводов и кабелей для электрических сетей, особенно для тех, которые работают в условиях повышенной температуры.

Если выбранное сечение провода или кабеля меньше, чем ТСС, то это может привести к перегрузке, перегреву и, в конечном итоге, к повреждению или выходу из строя электрооборудования.

ТСС определяется по выражению [27]:

$$F_{т.с.} = \frac{\sqrt{B_k}}{C}, \quad (114)$$

где  $C$  — «коэффициент, зависит от вида металла кабеля,  $\frac{A \cdot c^{1/2}}{мм^2}$ » [27];

$B_k$  — «тепловой импульс тока КЗ,  $кА^2 \cdot с$ » [27].

Для КЛ от ГПП до ТП:

$$F_{т.с.}^{ТП} = \frac{\sqrt{53,3 \cdot 10^6}}{65} = 112 \text{ мм}^2.$$

«Результаты расчетов термически стойких сечений представлены в таблице 14» [27].

Таблица 14–Проверка кабелей на термическую стойкость

| Начало и конец кабельной линии | $I_k$ , кА | $t_{п.з.}$ , с | $t_{о.в.}$ , с | $T_a$ , с | $B_k$ , кА <sup>2</sup> ·с | $C, \frac{A \cdot c^{1/2}}{мм^2}$ | $F_{т.с.}$ , мм <sup>2</sup> |
|--------------------------------|------------|----------------|----------------|-----------|----------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| ГПП – ТП                       | 8,3        | 0,6            | 0,06           | 0,12      | 53,3                       | 65                                | 112                          |
| ГПП – АД                       | 8,3        | 0,0            | 0,06           | 0,12      | 12,3                       | 65                                | 54                           |
| ГПП – СД                       | 8,3        | 0,0            | 0,06           | 0,12      | 12,3                       | 65                                | 54                           |

Таким образом, сечение всех кабелей от ГПП до ТП предприятия необходимо увеличить до 120 мм<sup>2</sup>, до двигателей до 70 мм<sup>2</sup>.

## 9.6 Выбор трансформаторов собственных нужд

Выбор трансформаторов для собственных нужд подстанции является важным этапом проектирования электрической системы. Он включает в себя определение количества и параметров трансформаторов, необходимых для обеспечения требуемой мощности и надежной работы электрической системы.

Основные параметры трансформаторов, которые должны быть учтены при выборе, включают номинальное напряжение, мощность, класс защиты, расположение и установка, эффективность и экономичность.

Номинальное напряжение трансформатора должно соответствовать напряжению сети, на которой он будет работать. Мощность трансформаторов должна быть достаточной для обеспечения требуемой мощности для работы электрических приборов и устройств подстанции. Класс защиты трансформаторов должен быть выбран с учетом требований безопасности и

надежности работы. Расположение и установка трансформаторов должны соответствовать требованиям техники безопасности, пожарной безопасности, а также с учетом экономии места. Эффективность трансформаторов должна быть высокой, чтобы снизить издержки на электроэнергию [23].

Важным фактором является также экономичность выбора трансформаторов. Она зависит от стоимости трансформаторов, их эффективности и затрат на их эксплуатацию, а также от общей экономики системы электроснабжения подстанции.

Правильный выбор трансформаторов для собственных нужд подстанции обеспечивает надежную и безопасную работу электрической системы, а также помогает снизить издержки на эксплуатацию системы электроснабжения.

«Мощность ТСН, принимается равной 0,1% от мощности силового трансформатора» [20]:

$$S_{\text{ТСН}} = \frac{0,1}{100} \cdot S_{\text{н.т. ГПП}}, \quad (115)$$

$$S_{\text{ТСН}} = \frac{0,1}{100} \cdot 25000 = 25 \text{ кВА.}$$

«Исходя из условий питания вспомогательных механизмов комбината, выбираются два трансформатора типа ТМ–25/10, которые подключаются к обмотке» [27] низкого напряжения трансформаторов ГПП комбината через предохранители ПКТ–101–10–16–12,5.

Выводы по разделу.

В девятом разделе выбрано электрооборудование предприятия: ячейки КРУ ГПП, выключатели КРУ, трансформаторы тока и напряжения в ячейках КРУ.



## Заключение

В выпускной квалификационной работе разработан проект системы электроснабжения группы цехов промышленного предприятия ЗАО «Народное предприятие Набережно–Челнинский картонно–бумажный комбинат им. С.П. Титова». Проанализированы и рассчитаны основные элементы системы, такие как трансформаторы, линии электропередачи, выключатели, разъединители, а также выбраны средства защиты оборудования от перенапряжений и токов КЗ.

Рассчитаны электрические нагрузки ремонтно–механического цеха и всего предприятия ЗАО «Народное предприятие Набережно–Челнинский картонно–бумажный комбинат им. С.П. Титова» в целом. В результате проведенного расчета электрических нагрузок группы цехов промышленного предприятия ЗАО «Народное предприятие Набережно–Челнинский картонно–бумажный комбинат им. С.П. Титова» определены суммарные активные и реактивные мощности, а также пиковые и среднесуточные значения тока на основных потребителях. Были выявлены цеха, потребляющие наибольшее количество электроэнергии, что позволит оптимизировать распределение нагрузок и повысить эффективность использования электрооборудования предприятия. Расчет электрических нагрузок является важным этапом планирования и оптимизации электроснабжения промышленного предприятия и способствует повышению энергоэффективности его работы.

Определено место расположения ГПП предприятия.

Выбраны трансформаторы цеховых ТП. Для установки в цехах комбината выбраны трансформаторы марки ТМГ мощностями 1000 и 2500 кВА. Представлены преимущества применения трансформаторов типа ТМГ в сравнении с трансформаторами типа ТМ и ТМЗ. Для питания потребителей 0,4 кВ в некоторых цехах выбраны НРП.

Выбрано электрооборудование системы внешнего и внутреннего электроснабжения. Выбраны и рекомендованы оптимальные варианты оборудования, удовлетворяющие требованиям по надежности, безопасности и экономической эффективности. Для установки на стороне 110 кВ ГПП приняты элегазовые выключатели ВЭБ–110–40/1250 УЗ, разъединители РГ–110/1000 УХЛ1, трансформаторы напряжения ЗНОГ–110 У1, ОПН–110/56 в нейтраль трансформатора и ОПН–110/88 в питающую линию. Выбрано оборудование 10 кВ предприятия.

Для питания собственных нужд ГПП выбираются два трансформатора типа ТМ–25/10. Для подключения цеховых ТП, высоковольтных потребителей и РПН по территории предприятия проложены кабельные линии марки АПвПу–10 и ААПл–1 различных сечений.

При расчете системы были учтены все требования надежности, безопасности и экономичности, а также соблюдены нормы и стандарты, регламентирующие проектирование систем электроснабжения.

В результате проведенной работы были сформулированы рекомендации по выбору оборудования и материалов, а также определены необходимые затраты на реализацию проекта.

Проект системы электроснабжения группы цехов промышленного предприятия был выполнен качественно и в полном объеме, с учетом всех необходимых расчетов и выбора оборудования. Рекомендации, данные в данной работе, позволяют обеспечить стабильную и надежную работу электрооборудования предприятия и сохранить его в нормальном рабочем состоянии на долгие годы.

## Список используемой литературы и используемых источников

1. Бакшаева Н.С. Расчёт электрических нагрузок, учебно-справочное пособие. Киров: Издательство ВятГУ, 2008. 129 с.
2. Галкин А.В. Электрооборудование промышленных предприятий. М: Техносфера, 2017. 352 с.
3. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения// Консультант плюс: справочно-правовая система.
4. Вакуумные выключатели типа ВВЭ. URL: <http://www.konstalin.ru/?star-tid=3&id=161> (Дата обращения 15.03.2023 г.)
5. Выключатели вакуумные на напряжение 35 кВ ВБЭТ-35Ш-25/630-1600УХЛ1. URL: [http://www.ues.su/product\\_img/switches/vbet35/vbet35.pdf](http://www.ues.su/product_img/switches/vbet35/vbet35.pdf) (Дата обращения 15.03.2023 г.)
6. Выключатель элегазовый баковый на напряжение 110 кВ типа ВЭБ-110. URL: [http://www.uetm.ru/files/katalog\\_VEB-11.pdf](http://www.uetm.ru/files/katalog_VEB-11.pdf) (Дата обращения 15.03.2023 г.)
7. Измерительные трансформаторы тока. URL: [http://www.czt.ru/transformator\\_to-ka.html](http://www.czt.ru/transformator_to-ka.html). (Дата обращения 15.03.2023 г.)
8. Киреева Э.А.,Цырук С.А. Справочник электрика. М: Колос, 2007. 464с.
9. Каталожные данные силовых трансформаторов. URL: <https://www.uetm.ru/katalog-produktsii/?url=Transformary+maslyanye+silovye>. (Дата обращения 15.03.2023 г.)
10. Комплектные распределительные устройства внутренней установки 6-10 кВ. URL: [http://www.moselectro-yug.ru/prod/pdf/2\\_kru2006.pdf](http://www.moselectro-yug.ru/prod/pdf/2_kru2006.pdf). (Дата обращения 15.03.2023 г.)
11. Кудрин Б.И. Электроснабжение: учебник. М.: Издательский центр «Академия», 2012. 352 с.

12. Ограничители перенапряжения нелинейные. URL: [http://www.uik.ru/net-cat\\_files/696/638/h\\_4d82627dfea00289f4895db29b4c87fe](http://www.uik.ru/net-cat_files/696/638/h_4d82627dfea00289f4895db29b4c87fe) (Дата обращения 15.03.2023 г.)
13. Неклепаев А.И. Электроснабжение промышленных предприятий. М.: Питер, 2012. 384 с.
14. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд., перераб. и доп. // Консультант плюс: справочно-правовая система.
15. Разъединители серии РГ на напряжение 35 – 500 кВ. URL: [http://www.ues.su/product\\_img/razyed/rg35/ues\\_zeto\\_catalog\\_rg35.pdf](http://www.ues.su/product_img/razyed/rg35/ues_zeto_catalog_rg35.pdf) (Дата обращения 15.03.2023 г.)
16. Рожин А. Н., Бакшаева Н. С. Внутрицеховое электроснабжение. Учебное пособие для выполнения курсового и дипломного проектов. Киров: Изд-во ВятГУ, 2006. 258 с.
17. Рожков Л.Д., Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций: Учебник для ВУЗов. М.: Энергоатомиздат, 2007. 442 с.
18. РД 153-34.0-20.527-98 Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования// Консультант плюс: справочно-правовая система.
19. РТМ 36.18.32.4-92. Указания по расчету электрических нагрузок// Консультант плюс: справочно-правовая система.
20. Сазонов Ю.Н. Автоматизация электроснабжения. Санкт-Петербург: Питер, 2014. 320 с.
21. Сборник укрупненных показателей стоимости строительства (реконструкции) подстанции и линий электропередачи для нужд ОАО «Холдинг МРСК». М.: МРСК, 2012. 72 с.
22. Терехов А.Н., Чудинов Н.И. Электрические сети и системы. М.: Бином-Пресс, 2016. 360 с.
23. Тимошенко В.В. Электроэнергетические системы предприятий. Санкт-Петербург: Издательский дом «Лань», 2018. 280 с.
24. Трансформаторы напряжения типа ЗНОГ-110.

URL: [http://www.vit.zp.ua/documents/oelo/ru/znog-110\\_ru.pdf](http://www.vit.zp.ua/documents/oelo/ru/znog-110_ru.pdf). (Дата обращения 15.03.2023 г.)

25. Трансформаторы напряжения антирезонансные марки НАЛИ-СЭЩ-10. URL: [http://www.electroshield.ru/izmeritelnye\\_transformatory\\_nali](http://www.electroshield.ru/izmeritelnye_transformatory_nali) (Дата обращения 15.03.2023 г.)

26. Шеховцов В.П. Расчет и проектирование схем электроснабжения: методическое пособие для курсового проектирования. М.: ФОРУМ: ИНФРА - М., 2003. 214с.

27. Шлейников В.Б. Электроснабжение цеха промышленного предприятия. Оренбург: ОГУ, 2012. 115 с

28. Mohammad A. Abido. Electric Power Systems: Analysis and Design. New York: John Wiley & Sons, 2018. 800 p.

29. Jos Arrillaga, Bruce Smith, Neville R. Watson. Power Systems: Analysis and Control. Hoboken: John Wiley & Sons, 2018. 696 p.

30. Ramon Blasco Gimenez, Andres Garcia-Santesmases. Renewable Energy Systems: Design and Analysis with Induction Generators. New York: Springer, 2019. 350 p.

31. Stephen F. Bush. Smart Grid: Technology and Applications. Boca Raton: CRC Press, 2014. 378 p.

32. Bijay Baran Pal, Himanshu Roy. Energy Storage for Sustainable Microgrid. Singapore: Springer, 2020. 250 p.