

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

Институт машиностроения, 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 «Проектирование системы электроснабжения цеха сборки низковольтных устройств ООО «Ди групп»»

Обучающийся

А.М. Морозов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, С.В. Шаповалов

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

Тольятти 2025

## Аннотация

Выпускная квалификационная работа посвящена проектированию системы электроснабжения цеха сборки низковольтных комплектных устройств ООО «Ди Групп». Актуальность темы обусловлена необходимостью обеспечения надёжного и безопасного энергоснабжения современного производственного предприятия, где электроприёмники относятся ко II категории по надёжности и предъявляют повышенные требования к качеству электроэнергии.

Цель работы - разработка системы электроснабжения цеха с учётом технологических особенностей производства, нормативных требований и перспектив увеличения нагрузок.

Задачи работы включают:

- анализ исходных данных предприятия и характеристик цеха;
- расчёт электрических нагрузок и распределение приёмников по пунктам питания;
- выбор трансформаторов и проверка их перегрузочной способности;
- расчёт освещения и компенсации реактивной мощности;
- расчёт токов короткого замыкания и проверка оборудования на стойкость;
- выбор кабелей, аппаратов защиты и распределительных устройств;
- разработку конструктивных решений трансформаторной подстанции;
- выбор устройств релейной защиты на базе микропроцессорных терминалов «Орион-2».

Выпускная квалификационная работа включает пояснительную записку объемом 64 страниц, дополненную 13 таблицами, 8 рисунками и 6 чертежами формата А1.

## Содержание

Введение.....	4
1 Анализ исходных данных по электроснабжению потребителей предприятия .....	6
1.1 Общие сведения о предприятии и его производственной деятельности	6
1.2 Характеристика цеха сборки низковольтных комплектных устройств ..	7
1.3 Требования к электроснабжению цеха .....	9
2 Расчет параметров системы внутреннего электроснабжения цеха сборки низковольтных комплектных устройств.....	12
2.1 Распределение приёмников по пунктам питания .....	12
2.2 Определение расчётных нагрузок по пунктам питания.....	13
2.3 Выбор схемы внутреннего электроснабжения.....	20
2.4 Компенсация реактивной мощности.....	22
3 Расчет осветительной системы .....	26
3.1 Выбор типа светильников и высота подвеса.....	26
3.2 Размещение светильников в помещениях цеха .....	27
3.3 Светотехнический расчет освещения цеха.....	30
4 Выбор и расчет числа и мощности трансформаторов, выбор кабельной линии .....	33
5 Расчет токов короткого замыкания .....	36
6 Выбор и расчет электрических аппаратов и проводников .....	43
6.1 Выбор и расчет электрических аппаратов.....	43
6.2 Выбор и расчет проводников .....	45
7 Выбор основного электрооборудования и его проверка .....	50
7.1 Конструктивные решения для трансформаторной подстанции.....	50
7.2 Проверка выключателя нагрузки и предохранителя.....	51
8 Выбор устройств релейной защиты .....	55
Заключение .....	61
Список используемой литературы и используемых источников.....	63

## Введение

Современное промышленное производство невозможно представить без надежной и устойчивой системы электроснабжения. Повышение уровня автоматизации, использование энергоемкого оборудования и внедрение современных технологий приводят к росту потребления электроэнергии, а также к повышению требований к качеству и надежности электроснабжения. Особенно остро эти задачи стоят для предприятий, выпускающих электротехническую продукцию, где сбой в электропитании напрямую отражается на технологическом процессе и конечном качестве выпускаемых изделий.

Актуальность выбранной темы обусловлена необходимостью создания эффективных и безопасных систем электроснабжения для производственных цехов, относящихся ко II категории надежности по ПУЭ. Для таких объектов требуется наличие резервирования, применение современных систем релейной защиты, компенсации реактивной мощности и энергоэффективных решений в области освещения и распределения нагрузок. Недостатки существующих решений заключаются в том, что многие предприятия эксплуатируют устаревшие трансформаторные подстанции и распределительные устройства, которые не обеспечивают требуемого уровня надежности, энергоэффективности и пожарной безопасности.

Цель выпускной квалификационной работы – спроектировать систему электроснабжения цеха сборки низковольтных комплектных устройств ООО «Ди Групп», обеспечивающую надежное, безопасное и экономически эффективное электроснабжение с учетом требований действующих норм и перспективного увеличения нагрузок.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- проанализировать исходные данные предприятия и охарактеризовать технологические особенности проектируемого цеха;
- рассчитать электрические нагрузки и распределить приёмники по пунктам питания;
- рассчитать и спроектировать систему внутреннего освещения цеха;
- рассчитать и выбрать кабельные линии и аппараты защиты;
- рассчитать токи короткого замыкания и проверить электрическое оборудование на термическую и динамическую стойкость;
- выбрать число и мощность силовых трансформаторов и проверить их работу при перегрузках;
- разработать конструктивные решения трансформаторной подстанции;
- предложить систему релейной защиты на базе микропроцессорных терминалов «Орион-2»;
- внедрить мероприятия по повышению энергоэффективности, включая компенсацию реактивной мощности.

Таким образом, проектирование системы электроснабжения позволит устранить выявленные недостатки существующей практики - недостаточный уровень надежности, отсутствие резервирования и низкую энергоэффективность. Итогом работы станет проект комплексной системы электроснабжения, обеспечивающей соответствие современным требованиям [8, 12, 14] а также создающей основу для устойчивой и безопасной работы предприятия.

# **1 Анализ исходных данных по электроснабжению потребителей предприятия**

## **1.1 Общие сведения о предприятии и его производственной деятельности**

ООО «Ди Групп» - российская производственно-инжиниринговая компания, зарегистрированная в Москве, с филиалами в г. Фрязино, г. Чебоксары и г. Псков. Основанная в 2010 году, компания специализируется на комплексных решениях в сфере электроснабжения, автоматизации и диспетчеризации инженерных систем.

Основное направление деятельности - производство низковольтных комплектных устройств (НКУ) для промышленных, коммерческих и энергетических объектов. Предприятие выпускает широкий спектр изделий:

- главные и распределительные щиты (ГРЩ, ВРУ, ЩО-70, ЩР);
- шкафы управления для вентиляции, насосного оборудования, освещения и технологических установок (ШУ, ШУТП, АВР);
- щиты учёта электроэнергии, шкафы телемеханики и автоматизации;
- специализированные НКУ, включая взрывозащищённые шкафы, сертифицированные по стандартам ЕАЭС;
- НКУ на заказ для объектов нефтегазовой отрасли, ЖКХ и альтернативной энергетики.

В рамках деятельности ООО «Ди Групп» выполняется весь цикл работ: проектирование, производство, испытания, сертификация, монтаж и обслуживание оборудования. Производственные процессы обеспечены современным оборудованием: от станков лазерной резки, сварочных полуавтоматов и паяльных станций до профессиональных стендов для электрических испытаний.

Также предприятие располагает аккредитованной электротехнической лабораторией для проведения измерений, испытаний и приёмки электроустановок.

Компания реализует проекты по принципу полного цикла - от разработки проекта до ввода в эксплуатацию. Миссия - «простое решение непростой задачи» - подчёркивает ориентированность на высокие стандарты качества, безопасности и эффективности.

## **1.2 Характеристика цеха сборки низковольтных комплектных устройств**

Проектируемый цех сборки НКУ (низковольтных комплектных устройств) ООО «Ди Групп» представляет собой производственное помещение общей площадью 1440 м<sup>2</sup>, разделённое на специализированные участки, соответствующие основным этапам технологического процесса: подготовка материалов, механическая обработка, сборка, установка электроаппаратуры, испытания и складирование готовой продукции.

Цех по сборке низковольтных комплектных устройств (НКУ) ООО «Ди Групп» состоит из шести производственных помещений, каждое из которых выполняет определённую функцию в технологическом процессе производства:

- помещение подготовки материалов и комплектующих предназначено для приёмки, хранения, сортировки и первичной подготовки материалов и комплектующих перед дальнейшей их обработкой и сборкой;
- участок механической обработки и подготовки корпусов служит для механической обработки металлических деталей и подготовки корпусов шкафов НКУ;

- участок сборки шкафов НКУ предназначен для непосредственной сборки корпусов шкафов, установки в них внутренних конструкций и элементов крепления;
- участок установки электроаппаратуры и проводников предназначен для установки электрооборудования, прокладки проводов и монтажа электрических соединений внутри шкафов НКУ;
- участок проверки и испытаний предназначен для проверки и испытания готовых НКУ с целью выявления возможных дефектов и обеспечения высокого качества выпускаемой продукции;
- склад готовой продукции предназначен для временного хранения и организации отгрузки готовых комплектных устройств.

Планировка цеха организована в соответствии с требованиями производственной логистики, санитарных норм и требований электробезопасности. Все участки оснащены технологическим оборудованием, которое размещено согласно производственным потокам.

Особенности размещения оборудования и производственных участков представлены на рисунке 1.

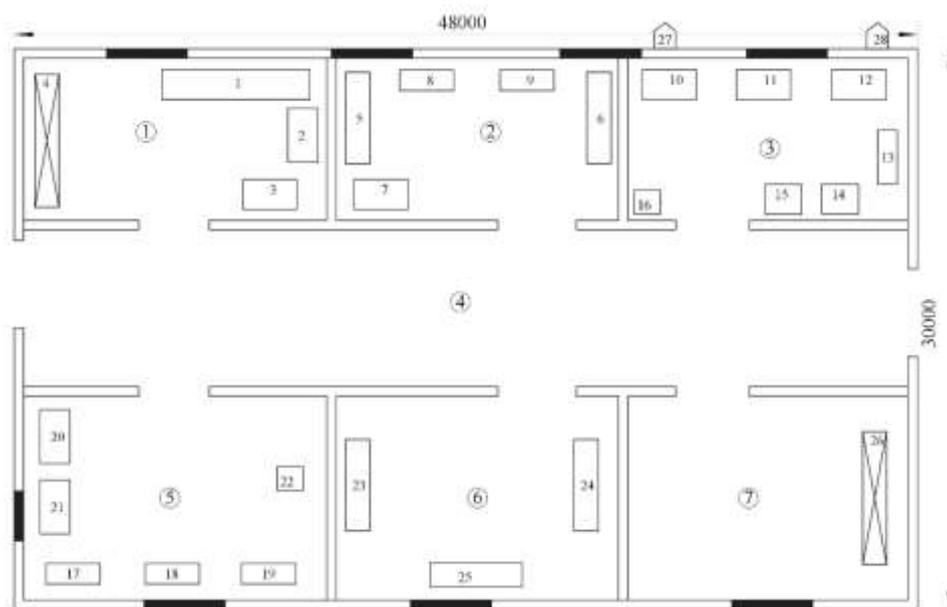


Рисунок 1 - План цеха сборки низковольтных комплектных устройств ООО «Ди Групп»

Каждый участок оборудован специализированными рабочими местами, что позволяет выполнять полный цикл работ: от механической обработки корпусов до сборки, тестирования и упаковки продукции.

На цеховых участках размещено оборудование различной мощности, включая:

- механические станки (ленточнопильный, гибочный пресс, фрезерные установки);
- монтажные и сварочные посты;
- испытательные стенды (для проверки изоляции, сопротивления);
- монтажные столы с осветительными и розеточными группами;
- системы вентиляции, кран-балки для перемещения тяжёлого оборудования.

На участке испытаний установлены нагрузочные стенды и стенды для измерения сопротивления изоляции, а также организованы рабочие места с электробезопасными панелями.

Особенностью цеха является высокая степень автоматизации отдельных операций и наличие стандартизированной схемы производства НКУ, что позволяет выполнять сборку как типовых, так и индивидуальных заказов.

### **1.3 Требования к электроснабжению цеха**

Электроснабжение цеха сборки НКУ должно обеспечивать надёжную и безопасную подачу электроэнергии ко всем участкам производственного процесса с учётом характера и типа нагрузок, их распределения во времени, а также требований к качеству и надёжности электроснабжения.

Проектируемый цех относится ко второй категории надёжности электроснабжения. Это означает, что при аварии на одном источнике питания должно быть предусмотрено резервирование от второго независимого ввода, либо использование автоматического ввода резерва (АВР). В случае

обесточивания основного ввода электропитание важных участков (испытательная зона, станки, система вентиляции) должно сохраняться.

Напряжение и тип системы заземления:

- основное питающее напряжение: 380/220 В, трёхфазное, частотой 50 Гц;
- система заземления - TN-C-S или TN-S;
- уровень напряжения на вводе: согласно [10], отклонение не более  $\pm 10\%$ ;
- на всех группах розеток, где применяются ручные электроинструменты, обязательна установка УЗО или дифференциальный автомат.

Оборудование цеха характеризуется наличием как трёхфазных нагрузок (станки, сварочные посты, испытательные стенды), так и однофазных (освещение, монтажные столы, офисные помещения). Требуется равномерное распределение фазной нагрузки.

Для отдельных участков характерны кратковременные, но значительные пусковые токи (например, при включении сварочного полуавтомата или нагревательных установок), что должно учитываться при расчётах кабелей и защитной аппаратуры.

Согласно [8]:

- все металлические конструкции (корпуса шкафов, станков) подлежат заземлению и подключению к системе уравнивания потенциалов;
- в зонах с повышенной опасностью (испытания, сварка) - применение спецзащит (резиновые коврики, диэлектрические перчатки, сигнальные табло);
- электрощитовое оборудование должно размещаться в специальных отсеках, недоступных для неавторизованного персонала.

## Выводы по разделу 1

В первом разделе были проанализированы исходные данные, необходимые для проектирования системы электроснабжения цеха сборки низковольтных комплектных устройств ООО «Ди Групп».

Рассмотрены сведения о предприятии, его местоположении, специализации и видах выпускаемой продукции. Установлено, что предприятие выполняет полный цикл работ по производству низковольтных комплектных устройств, включая проектирование, сборку, испытания и техническое сопровождение.

Характеристика проектируемого цеха показала, что производственный процесс организован поэтапно и включает в себя технологические зоны, оснащённые разнообразным электротехническим оборудованием, от металлообрабатывающих станков до испытательных стендов. Это требует надёжного и бесперебойного электроснабжения с учётом различного характера нагрузок.

В разделе также определены основные требования к электроснабжению цеха, включая вторую категорию надёжности, применение системы TN-C-S, необходимость резервирования питания, электробезопасности, равномерного распределения фазной нагрузки и внедрения энергоэффективных решений. Эти требования будут учтены в последующих этапах проектирования.

## 2 Расчет параметров системы внутреннего электроснабжения цеха сборки низковольтных комплектных устройств

### 2.1 Распределение приёмников по пунктам питания

В данном подразделе описывается логическое распределение электрических приёмников (оборудования, освещения, розеток, вентиляции и т.д.) по пунктам питания. Это необходимо для рационального построения системы электроснабжения, обеспечения надёжности, учёта характера нагрузки и упрощения кабельной разводки.

Распределение приёмников выполнено с учётом следующих факторов:

- территориального размещения оборудования в цехе;
- характера нагрузки (освещение, силовая, розеточная, вентиляционная, испытательная);
- режима работы оборудования (постоянная, периодическая, кратковременная);
- степени электробезопасности и необходимости резервирования;
- возможности равномерного распределения фазных нагрузок.

Группировка приёмников и обоснование пунктов питания представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Группировка приёмников и обоснование пунктов питания

Пункт питания	Состав приёмников	Характер нагрузки	Категория надёжности	Место установки
ГРЩ (Главный распределит)	Общепромышленная нагрузка, ввод в цех	Смешанная	II	В коридоре возле участков 5 и 6
ЩС1 - Силовой щит №1	Механическая обработка и помещение подготовки материалов: станки, сверлильные, сварка	Силовая, трёхфазная	II	На территории участка мехобработки
ЩС2 - Силовой щит №2	Участок сборки НКУ, склад готовой продукции	Силовая, смешанная	II	На территории участка сборки шкафов НКУ

Продолжение таблицы 1

Пункт питания	Состав приёмников	Характер нагрузки	Категория надёжности	Место установки
ЩСЗ - Силовой щит №3	Участок установки электроаппаратуры: монтажные инструменты, станки, стенды.	Силовая, смешанная	II	На территории участка установки аппаратуры
ЩО - Щит освещения	Общее и аварийное освещение всех зон цеха	Освещение, однофазная	II	В распределительной зоне или ГРЩ
ЩВ - Щит вентиляции	Системы приточно-вытяжной вентиляции и обогрева	Силовая, трёхфазная	II	У внешней стены рядом с вентиляторами
ЩИ - Щит испытаний	Испытательные стенды, стенды изоляции, лаборатории	Силовая, чувствительная	II	Вблизи испытательной зоны

Таким образом, потребители сгруппированы в 7 условных пунктов питания, что позволит в следующем разделе провести корректный расчёт расчётных нагрузок с учётом коэффициентов использования и мощности.

## 2.2 Определение расчётных нагрузок по пунктам питания

Расчёт электрических нагрузок является ключевым этапом проектирования системы электроснабжения, так как позволяет определить необходимую установленную мощность трансформаторов, параметры питающих кабелей, коммутационной и защитной аппаратуры.

В расчётах использованы данные о типовом технологическом оборудовании, применяемом на соответствующих участках цеха, а также нормативные коэффициенты спроса и мощности, установленные справочными таблицами по проектированию электроустановок [8].

Для каждой группы приёмников определены:

- установленная мощность (суммарная номинальная мощность оборудования участка);

- коэффициент использования ( $K_{и}$ ) - отношение фактической мощности к номинальной мощности;
- коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ ) - используется для пересчёта активной мощности в полную;
- расчётная активная мощность ( $P_p$ ), кВт;
- расчётная полная мощность ( $S_p$ ), кВА.

«Дальнейший расчет производится на примере ЩС1.

Коэффициент группового использования для распределительного пункта ЩС-1 вычисляется согласно нижеприведенной формуле [18]:

$$k_{\Sigma и} = \frac{\Sigma k_{и} \cdot P_{н}}{\Sigma P_{н}}, \quad (1)$$

$$k_{\Sigma и} = \frac{32,41}{66,4} = 0,49.$$

где  $k_{и}$  – коэффициент использования ЭП [9];

$P_{н}$  – паспортная мощность ЭП [9,18], кВт;

$\Sigma P_{н}$  – сумма номинальных мощностей в группе, кВт» [9].

«Эффективное число потребителей электроэнергии находится на основании следующей формулы:

$$n_{э} = \frac{(\Sigma P_{н})^2}{\Sigma_1^n P_{н}^2}, \quad (2)$$

$$n_{э} = \frac{(66,4)^2}{655,38} = 6,73.$$

где  $n$  – количество потребителей, шт» [22].

В соответствии с [6], если  $n_{э}=6$  и  $k_{и}=0,5$ , то расчетный коэффициент активной мощности  $K_p$  принимается равным 1,13.

«Соответственно, расчетная активная мощность будет получена из следующего уравнения [6]:

$$P_p = K_p \cdot \sum_{i=1}^n (K_u \cdot P_H)_i \quad (3)$$

$$P_p = 1,13 \cdot 32,41 = 36,62 \text{ кВт} \gg [6].$$

Итоговое значение реактивной мощности равно:

$$Q_p = 1,1 \cdot \sum_{i=1}^n (K_u \cdot P_H \cdot \operatorname{tg} \varphi)_i, \quad (4)$$

$$Q_p = 1,1 \cdot 25,57 = 28,127 \text{ квар.}$$

Полная расчетная потребляемая мощность ЩС-1 равняется [6]:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}, \quad (5)$$

$$S_p = \sqrt{36,62^2 + 28,127^2} = 46,18 \text{ кВА.}$$

Расчетный ток ЩС-1:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}}, \quad (6)$$

$$I_p = \frac{46,18}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 66,66 \text{ А.}$$

где  $U_{\text{НОМ}}$  - номинальное напряжение ЭП, В.

Так же на данном этапе проектирования производится ориентировочный расчёт электрических нагрузок на систему внутреннего освещения на основе удельной установленной мощности на 1 м<sup>2</sup> производственного помещения.

Точный расчет с подборкой осветительного оборудования будет выполнен в одном из следующих разделов.

В соответствии с проектными нормами [2] в таблице 2 приведены ориентировочные значения удельной мощности производственных помещений.

Таблица 2 - Ориентировочные значения удельной мощности производственных помещений

Назначение помещения	Удельная мощность освещения, Вт/м <sup>2</sup>
Производственные помещения	15-20
Склад готовой продукции	10-12
Испытательная зона, монтаж	18-20
Административные и коридоры	8-12

Установленная мощность источников света в помещении определяется по следующей формуле [7]:

$$P = P_{уд} \cdot S, \quad (7)$$

где  $P_{уд}$  - удельная мощность освещения, Вт/м<sup>2</sup>;

$S$  – площадь освещаемого помещения, м<sup>2</sup>.

Расчет освещенности для каждого участка представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Расчет освещения по участкам

Наименование помещения	Площадь, м <sup>2</sup>	Удельная мощность, Вт/м <sup>2</sup>	Расчётная мощность, кВт
Участок мехобработки	130	18	2,34
Участок сборки НКУ	130	18	2,34
Участок установки аппаратов и проводников	175	18	3,15
Участок испытаний	164	20	3,28
Склад готовой продукции	162	12	1,94

Продолжение таблицы 3

Наименование помещения	Площадь, м <sup>2</sup>	Удельная мощность, Вт/м <sup>2</sup>	Расчётная мощность, кВт
Помещение подготовки материалов	140	15	2,1
Коридор и вспомогательные зоны	395	10	3,95
Итого	1296	-	19,1

На основании приближённого расчёта общая установленная мощность системы освещения цеха составляет 19,1 кВт. Это значение будет учтено при расчете нагрузки на всех производственных участках.

Итоговый расчет нагрузки на каждый пункт электропитания представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Итоговый расчет нагрузки

ЭП	n, шт	P, кВт		K <sub>И</sub>	cos φ	K <sub>И</sub> P <sub>И</sub>	K <sub>И</sub> P <sub>И</sub> tgφ	np <sup>2</sup>	n <sub>Э</sub>	K <sub>р</sub>	P, кВт	Q, квар	S, кВА	I, А
		P, кВт	∑P, кВт											
ЩС-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ленточнопильный станок (1)	1	8,5	8,5	0,65	0,85	5,525	3,42	72,25	-	-	-	-	-	-
Сверлильный станок (2,3)	2	6	12	0,25	0,65	3	3,51	72	-	-	-	-	-	-
Кран-балка (4)	1	9,5	9,5	0,15	0,6	1,425	1,9	90,25	-	-	-	-	-	-
Гильотина для резки листового металла (5)	1	12	12	0,65	0,8	7,8	5,85	144	-	-	-	-	-	-
Гидравлический пресс для гибки металла (6)	1	15	15	0,65	0,8	9,75	7,31	225	-	-	-	-	-	-
Точильно-шлифовальный станок (7)	1	7	7	0,65	0,8	4,55	3,41	49	-	-	-	-	-	-
Верстак со встроенной системой освещения (8,9)	2	1,2	2,4	0,15	0,9	0,36	0,17	2,88	-	-	-	-	-	-

Продолжение таблицы 4

ЭП	n, шт	P, кВт		K <sub>И</sub>	cos φ	K <sub>И</sub> P <sub>И</sub>	K <sub>И</sub> P <sub>И</sub> tgφ	np <sup>2</sup>	nэ	Kp	P, кВт	Q, квар	S, кВА	I, А
		P, кВт	∑P, кВт											
Итого по ЩС-1:	9		66,4	0,49	0,79	32,41	25,57	655,38	6,73	1,13	36,62	28,127	46,18	66,66
ЩС-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Электрический шуруповёрт (зарядная станция) (10,11,12)	3	1,1	3,3	0,8	0,65	2,64	3,09	3,63	-	-	-	-	-	-
Сварочный полуавтоматический аппарат (13)	1	5,5	5,5	0,25	0,5	1,375	2,38	30,25	-	-	-	-	-	-
Паяльная станция (14,15)	2	6,5	13	0,8	0,95	10,4	3,42	84,5	-	-	-	-	-	-
Станок лазерной маркировки (16)	1	14	14	0,8	0,85	11,2	6,94	196	-	-	-	-	-	-
Кран-балка (26)	1	16	16	0,15	0,6	2,4	3,2	256	-	-	-	-	-	-
Итого по ЩС-2:	8		51,8	0,54	0,83	28,015	19,03	570,38	4,7	1,16	32,5	20,933	38,66	55,8
ЩС-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Монтажный стол с освещением и розетками (17,18,19)	3	1,1	3,3	0,4	0,9	1,32	0,64	3,63	-	-	-	-	-	-
Электрический монтажный инструмент (многофункциональный комплект) (20,21)	2	1,05	2,1	0,25	0,85	0,525	0,33	2,205	-	-	-	-	-	-
Станок для резки и зачистки проводов (22)	1	1,5	1,5	0,65	0,5	0,975	1,69	2,25	-	-	-	-	-	-
Итого по ЩС-3:	6		6,9	0,41	0,73	2,82	2,66	8,085	5,89	1,16	3,27	2,926	4,39	6,34
ЩИ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Продолжение таблицы 4

ЭП	n, шт	P, кВт		K <sub>и</sub>	cos φ	K <sub>и</sub> P <sub>н</sub>	K <sub>и</sub> P <sub>н</sub> tgφ	np <sup>2</sup>	nэ	Kp	P, кВт	Q, квар	S, кВА	I, А
		P, кВт	∑P, кВт											
Стенд для электрических испытаний (нагрузочный стенд) (23)	1	2,2	2,2	0,65	0,85	1,43	0,89	4,84	-	-	-	-	-	-
Испытательный стенд измерения сопротивления изоляции (24)	1	1,3	1,3	0,4	0,65	0,52	0,61	1,69	-	-	-	-	-	-
Система компьютеризированного контроля и учета (25)	1	1,1	1,1	0,8	0,85	0,88	0,55	1,21	-	-	-	-	-	-
Итого по ЩИ:	3		4,6	0,62	0,81	2,83	2,05	7,74	2,73	1,6	4,53	2,255	5,06	7,3
ЩВ														
Приточный вентилятор (27)	1	18	18	0,8	0,85	14,4	8,92	324						
Вытяжной вентилятор (28)	1	22	22	0,8	0,85	17,6	10,91	484						
Итого по ЩВ:	2		40	0,8	0,85	32	19,83	808	1,98	1	32	21,81 3	38,73	55,9
Итого силовая нагрузка:	28		169,7	0,58	0,82	98,075	69,14	2049 ,585	14,05	0,9	88,2 7	69,14	112,12	161,8 3
Освещение:											19,1	-	19,1	27,57
Сторонняя нагрузка											135, 6	105,6		
Итого нагрузка по цеху:											242, 97	174,7 4	299,28	431,9 7

Общая расчетная активная мощность цеха составила 242,97 кВт, а расчетная полная мощность – 431,97 кВА. Эта нагрузка также включает внешние нагрузки (общественное здание, бассейн, торговый центр), присоединенные к данной трансформаторной подстанции.

## 2.3 Выбор схемы внутреннего электроснабжения

Внутренняя схема электроснабжения цеха сборки НКУ разрабатывается с учётом следующих факторов:

- конфигурации цеха и распределения оборудования по участкам;
- результатов расчёта нагрузок по пунктам питания;
- требований по надёжности и электробезопасности (вторая категория по [8]);
- минимизации кабельных трасс и оптимизации схемы резервирования.

Принята радиальная система электроснабжения, при которой от главного распределительного щита (ГРЩ), расположенного в коридоре, отходят кабельные линии к каждому пункту питания - силовым, осветительным, розеточным и специализированным щитам.

Такая схема обеспечивает:

- простоту исполнения и эксплуатации;
- чёткое разграничение зон ответственности по участкам;
- удобство защиты и учёта электроэнергии;
- возможность равномерного распределения фазных нагрузок.

Главный распределительный щит (ГРЩ) питается от трансформаторной подстанции 0,4 кВ. В нём размещены:

- автоматические выключатели на каждую отходящую линию;
- устройство для учёта электроэнергии;
- вводной коммутационный аппарат с возможностью подключения АВР (при необходимости).

От ГРЩ отходят линии к следующим щитам:

- ЩС1 - участок механической обработки;
- ЩС2 - участок сборки и установки НКУ;
- ЩС3 – участок установки электроаппаратуры и проводников;

- ЩО - щит освещения, с разделением на группы;
- ЩВ - щит вентиляции;
- ЩИ - щит испытательных установок.

Согласно второй категории надёжности, питание ГРЩ должно быть организовано по двум вводам от трансформаторов с возможностью автоматического или ручного переключения (АВР). Это позволяет обеспечить электроснабжение в случае отказа одного из вводов.

На рисунке 2 представлена упрощенная однолинейная схема внутреннего электроснабжения цеха.

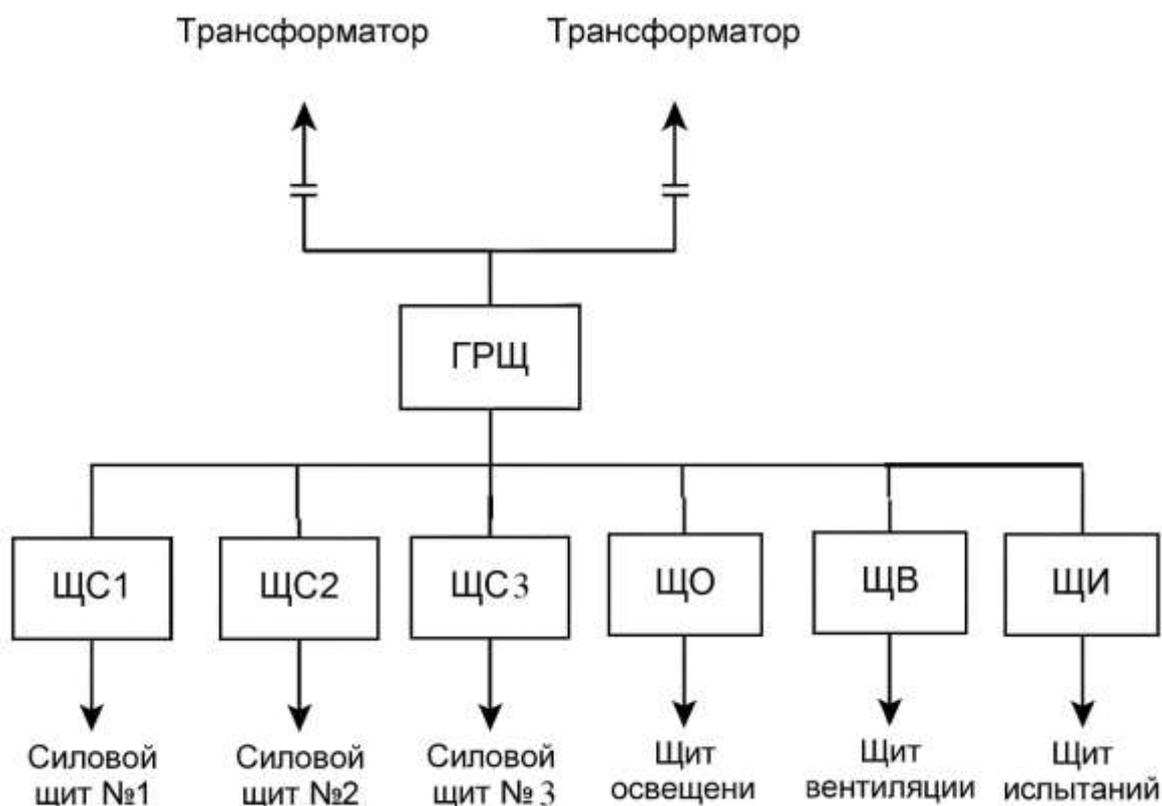


Рисунок 2 - Упрощенная однолинейная схема внутреннего электроснабжения цеха

В рамках принятой схемы возможно внедрение [19]:

- модульных АВР;
- учёта по каждому участку (с многофункциональными счётчиками);
- интеграции в АСКУЭ или диспетчеризацию параметров питания (особенно для ЩИ и ЩВ).

## 2.4 Компенсация реактивной мощности

В производственных цехах значительную долю нагрузки составляют электродвигатели, трансформаторы, дроссели сварочных аппаратов, что приводит к снижению коэффициента мощности ( $\cos\varphi$ ) и увеличению потребления реактивной мощности. Это негативно влияет на экономичность работы системы электроснабжения, так как вызывает:

- дополнительные потери электроэнергии в кабелях и трансформаторах;
- увеличение загрузки трансформаторов и питающих линий;
- необходимость учета и оплаты потребления реактивной энергии в случаях применения двухкомпонентных тарифов на электрическую энергию.

«Тангенс  $\varphi$  до компенсации реактивной мощности рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\varphi &= \frac{Q_p}{P_p}, \\ \operatorname{tg}\varphi &= \frac{174,74}{242,97} = 0,72. \end{aligned} \quad (8)$$

где  $Q_p$  – значение реактивной расчетной мощности, квар;

$P_p$  – значение активной расчетной мощности, кВт» [22].

«Величина заданной реактивной мощности батарей конденсаторов согласно условию:

$$\begin{aligned} Q_{\text{к.расч}} &= \alpha \cdot P_p (\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi_{\text{к}}), \\ Q_{\text{к.расч}} &= 0,9 \cdot 242,97 (0,72 - 0,33) = 85,3 \text{ квар}. \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\alpha$  - коэффициент, учитывающий увеличение  $\cos\varphi$ ;

$\operatorname{tg}\varphi$  - коэффициент реактивной мощности до компенсации;

$tg\varphi_k$ - коэффициент реактивной мощности после компенсации» [11].

С учётом возможного роста нагрузки, подключения сторонних потребителей и переменного режима работы цеха принимается установка двух автоматических КРМ 0,4 кВ по 50 кВАр каждая (суммарно до 100 кВАр) с ограничением по уставке контроллера на текущем этапе (например, до 40–50 кВАр).

Принятое решение:

- тип: УКРМ (КРМ-0,4), автоматическое ступенчатое регулирование;
- номинальная мощность (каждой установки): 50 квар;
- номинальное напряжение: ~400/230 В, 50 Гц;
- система: TN-S/TN-C-S;
- ступенчатость (рекомендуемая конфигурация одной установки): 5 + 5 + 10 + 10 + 20 = 50 квар (5 ступеней, обеспечивает точную подстройку  $\cos \varphi$  в широком диапазоне нагрузок);
- степень защиты: не ниже IP31 (внутреннее размещение), при запылённости - IP54;
- климатическое исполнение: У3;
- управление: микропроцессорный контроллер  $\cos \varphi$  (уставка  $\cos \varphi_n = 0,95$ ; допускается ограничение максимальной выдачи реактивной мощности);
- защита: автоматические выключатели/предохранители по ступеням, тепловентиляция, контроль температуры.

Эксплуатационные уставки (рекомендация):

- целевая уставка:  $\cos \varphi = 0,95$ ;
- задержки включения/отключения ступеней: 10-20 с / 30-60 с;
- блокировка включения при перенапряжении/перегреве;

- ограничение максимальной реактивной мощности (пока) до  $\approx 40-50$  квар суммарно, с возможностью последующего снятия ограничения при росте нагрузки.

Внешний вид принятой к установке УКРМ представлен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Внешний вид УКРМ

Обоснование выбора:

- покрывают текущую потребность (85,3 квар) с технологическим запасом;
- позволяют гибко регулировать  $\cos \varphi$  малыми ступенями;
- повышают отказоустойчивость (в случае вывода одной установки в ремонт);
- снижают токи, потери и высвобождают мощность трансформаторов.

## Выводы по разделу 2

В ходе выполнения раздела произведено распределение электроприёмников цеха сборки низковольтных комплектных устройств по пунктам питания с учётом планировки и характера технологических процессов.

Выполнен расчёт электрических нагрузок по каждому пункту питания с использованием коэффициентов использования и мощности, что позволило определить общую расчётную активную мощность цеха 242,97 кВт и полную мощность около 299,28 кВА.

Проведён упрощённый расчёт электрических нагрузок на систему освещения по удельной мощности на 1 м<sup>2</sup>, согласно которому суммарная установленная мощность освещения составила 19,1 кВт. Также рассчитана потребность в компенсации реактивной мощности (85,3 квар), на основании чего выбраны две автоматические установки компенсации КРМ-0,4 кВ по 50 квар каждая.

В результате получен комплекс исходных параметров, необходимых для разработки внутренней схемы электроснабжения, выбора сечений кабелей, аппаратов защиты и последующего детального проектирования системы освещения и компенсации реактивной мощности.

### 3 Расчет осветительной системы

#### 3.1 Выбор типа светильников и высота подвеса

Для освещения цеха сборки низковольтных комплектных устройств выбраны светодиодные светильники промышленного типа, обладающие высокой энергоэффективностью, большим сроком службы и устойчивостью к запылённости.

В качестве базового решения приняты светильники типа High-bay LED мощностью 100 Вт с световым потоком порядка 12 000 лм. Такие светильники широко применяются в производственных и складских помещениях с высотой установки 3-8 м.

В таблице 5 представлены технические характеристики принятого к установки светильника.

Таблица 5 – Технические характеристики светильника UFO High Bay LED 100W

Модель-аналог	Степень защиты	Срок службы, ч	Световой поток, лм	Коэффициент мощности	Цветовая температура, К	Класс защиты	Диапазон рабочих температур, °С
UFO High Bay LED 100W	IP65	не менее 50 000	12000-13500	не ниже 0,95	4000-5000	I	-40 до +50

Высота производственного помещения составляет 4 м. Светильники будут закрепляться непосредственно на потолок с использованием стандартного крепления (подвес на крюк/скобу), что упрощает монтаж и обслуживание.

На рисунке 4 представлен внешний вид принятого к установки светильника.



Рисунок 4 – Внешний вид светильника UFO High Bay LED 100W

Расчётная рабочая высота (от уровня пола до плоскости светильника) - 4 м. Данное значение обеспечивает достаточный уровень освещённости в зоне рабочих поверхностей при использовании светильников типа UFO High Bay.

### **3.2 Размещение светильников в помещениях цеха**

Размещение светильников в цехе сборки низковольтных комплектных устройств выполнено с учётом следующих факторов:

- соответствия нормируемым уровням освещённости согласно [15];
- равномерного распределения светового потока на рабочих поверхностях;
- минимизации зон повышенной яркости и теней;
- удобства монтажа и обслуживания светильников;

- рационального использования принятого типа светильников (High-bay LED 100 Вт, 12 000–13 000 лм, IP65).

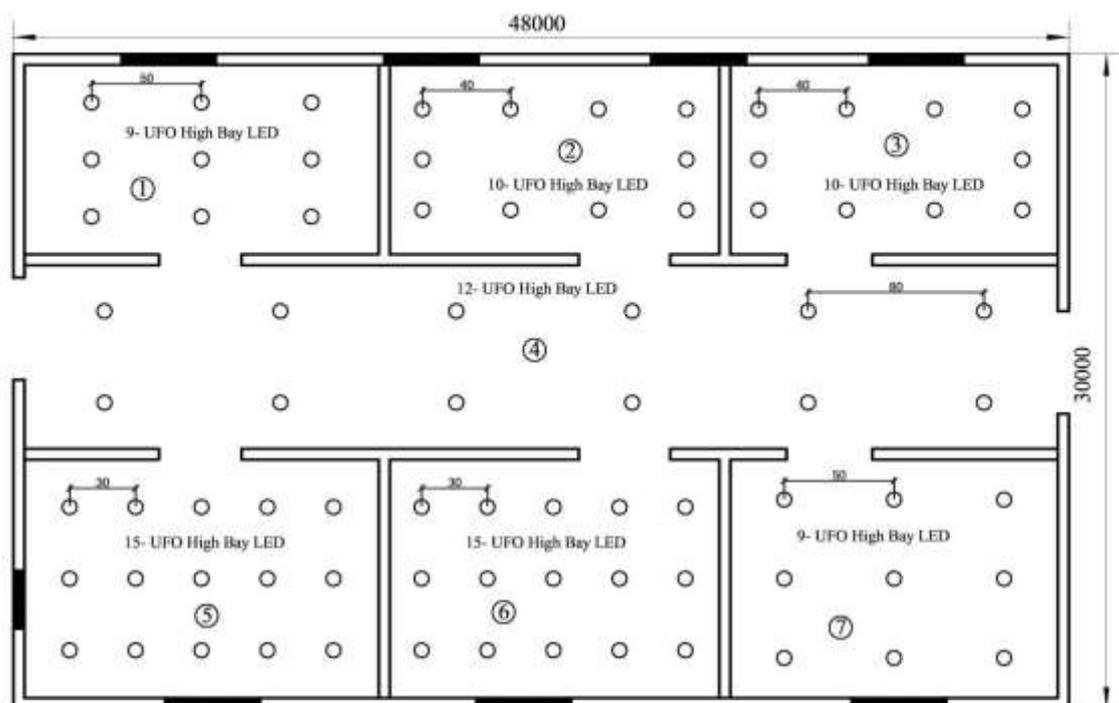
Высота подвеса светильников принята 4 м от уровня пола (крепление непосредственно к потолку). Такое решение обеспечивает достаточную равномерность и исключает необходимость подвесных конструкций.

Размещения по зонам:

- участок механической обработки (площадь 130 м<sup>2</sup>). Оснащён 10 светильниками, размещёнными рядами с равномерным шагом вдоль производственных линий. Расстояние между светильниками – 4-5 м, что обеспечивает среднюю освещённость 300 лк;
- участок сборки НКУ (130 м<sup>2</sup>). Установлено 10 светильников. Светильники расположены в два параллельных ряда, равномерно распределённых над монтажными столами. Средняя освещённость - 300 лк;
- участок установки аппаратуры и проводников (175 м<sup>2</sup>). Размещено 15 светильников. Они сгруппированы в ряды по 5 светильников, равномерно покрывающие рабочую поверхность. Освещённость - около 400 лк;
- участок испытаний (164 м<sup>2</sup>). Предусмотрено 15 светильников. Установка выполнена с повышенной плотностью размещения (шаг 3-3,5 м), что обеспечивает освещённость на уровне 400 лк, требуемую для испытательных работ;
- склад готовой продукции (162 м<sup>2</sup>). Установлено 9 светильников, размещённых над проходами и стеллажами. Средняя освещённость составляет 200 лк;
- подготовка материалов (140 м<sup>2</sup>). Оснащён 9 светильниками, равномерно распределёнными по площади помещения. Освещённость - 300 лк;

– коридоры и вспомогательные зоны (395 м<sup>2</sup>). Установлено 12 светильников. Светильники расположены рядами вдоль оси коридоров, шаг установки 4-5 м. Средняя освещённость - 150 лк.

На рисунке 5 представлена схема размещения светильников на плане цеха.



*Экспликация помещений*

Номер на плане	Наименование	Площадь, м <sup>2</sup>
1	Помещение подготовки материалов и комплектующих	140
2	Участок механической обработки и подготовки корпусов	130
3	Участок сборки шкафов НКУ	130
4	Коридор	395
5	Участок установки электроаппаратуры и проводников	175
6	Участок проверки и испытаний	164
7	Склад готовой продукции	162

Рисунок 5 – Схема размещения светильников на плане цеха

Общее количество принятых светильников по цеху составляет 80 шт., суммарная установленная мощность системы освещения - 8 кВт. Такое решение обеспечивает выполнение норм освещённости во всех помещениях цеха и создаёт благоприятные условия для безопасного и продуктивного труда.

### 3.3 Светотехнический расчет освещения цеха

Светотехнический расчёт искусственного освещения производится с целью проверки соответствия проектируемой осветительной установки санитарным нормам и требованиям охраны труда. В промышленных помещениях расчёт ведут по методу светового потока (коэффициента использования), который является наиболее распространённым и рекомендованным [2].

«Светотехнический расчёт искусственного освещения выполняется по методу светового потока (коэффициента использования), основанному на уравнении:

$$F = \frac{E \cdot K \cdot S}{n \cdot \eta}, \quad (10)$$

где  $E$  - нормируемая освещённость, лк;

$K$  - коэффициент запаса;

$S$  - площадь помещений, м<sup>2</sup>;

$n$  - количество светильников;

$\eta$  - коэффициент использования светового потока, о.е» [7].

Коэффициент запаса учитывает снижение светового потока в процессе эксплуатации вследствие старения ламп, загрязнения арматуры и помещений. Коэффициент использования определяется отношением светового потока, падающего на рабочую поверхность, к общему световому потоку ламп и зависит от геометрии помещения, отражающей способности поверхностей и светораспределения выбранного светильника.

В качестве источников света применены светильники LED High-bay UFO 100 Вт, 12 000-13 000 лм, IP65.

Светотехнический расчет освещенности помещений цеха представлен в таблице 6.

Таблица 6 – Светотехнический расчет освещенности помещений цеха

Помещение	Площадь, м <sup>2</sup>	Норма, лк	Кол-во светильников, шт	Установленная мощность, кВт	Средняя освещённость, лк
Участок мехобработки	130	300	10	1,0	300
Участок сборки НКУ	130	300	10	1,0	300
Участок установки аппаратов и проводников	175	400	15	1,5	400
Участок испытаний	164	400	15	1,5	400
Склад готовой продукции	162	200	9	0,9	200
Подготовка материалов	140	300	9	0,9	300
Коридоры и вспомогательные зоны	395	150	12	1,2	150
Итого по цеху	1296	-	80	8,0	-

Проведённый светотехнический расчёт показал, что выбранные светильники и схема их размещения обеспечивают нормативные уровни освещённости на рабочих местах:

- в зонах механической обработки, сборки и испытаний - от 300 до 400 лк;
- в складах, подготовительных и вспомогательных помещениях - 150-300 лк.

Общая установленная мощность системы освещения составляет 8,0 кВт. Осветительная установка обеспечивает требуемый уровень световой среды, соответствующий нормам охраны труда и санитарным требованиям.

### Выводы по разделу 3

В третьем разделе был выполнен расчёт системы искусственного освещения цеха сборки низковольтных комплектных устройств. На основании нормативных требований были определены необходимые уровни освещённости для различных зон производственного помещения: 300-400 лк для рабочих участков, 400 лк для испытательных зон, 200–300 лк для

складских и подготовительных помещений, 150 лк для коридоров и вспомогательных зон [14].

В качестве источников света приняты промышленные светодиодные светильники типа High-bay LED 100 Вт со световым потоком около 12 000 лм и степенью защиты IP65, что обеспечивает их надёжную эксплуатацию в условиях запылённости. Высота установки светильников принята 4 м (крепление непосредственно к потолку).

Разработана схема размещения светильников по зонам цеха, позволяющая обеспечить равномерное распределение освещённости. В результате расчётов установлено:

- общее количество светильников - 80 шт.;
- суммарная установленная мощность системы освещения - 8,0 кВт;
- фактические уровни освещённости соответствуют нормируемым значениям по всем зонам цеха.

Таким образом, проектируемая система освещения обеспечивает требуемые параметры световой среды, отвечает нормативным требованиям и способствует созданию безопасных и комфортных условий труда.

#### 4 Выбор и расчет числа и мощности трансформаторов, выбор кабельной линии

Выбор силовых трансформаторов базируется на расчётной полной мощности потребителей, требуемой категории надёжности, перспективе роста нагрузки и допустимых режимах перегрузки. Для электроприёмников II категории рационально применять два трансформатора, обеспечивая питание при отказе одного (АВР на стороне 0,4 кВ), а также равномерное распределение нагрузки в нормальном режиме.

Критерии выбора: соответствие номинальной мощности, допустимая длительная загрузка, допустимые кратковременные перегрузки (по ГОСТ/РД), уровень потерь, условия охлаждения и температура окружающей среды. Тепловая проверка строится на модели нагрева обмоток (горячая точка) и ускорения старения изоляции; перегрузочная способность зависит от предварительной загрузки, окружающей температуры и длительности перегрузки.

«Номинальная мощность трансформаторов определяется по условию:

$$S_{\text{ном.т}} \geq \frac{S_p}{\beta_T}, \quad (11)$$
$$S_{\text{ном.т}} \geq \frac{299,28}{1,4} = 213,77 \text{ кВА.}$$

где  $\beta_T$  – допустимый коэффициент перегрузки» [13, 17].

Для проектируемого объекта приняты два масляных герметичных трансформатора ТМГ-250/10/0,4.

Далее проводится проверка загрузки силового трансформатора в аварийном режиме [3]:

$$K_a = \frac{S_p}{S_{\text{ном.т.р}}}, \quad (12)$$

$$K_a = \frac{299,28}{250} = 1,2.$$

С учётом расчётной полной мощности 299,28 кВА приняты два трансформатора ТМГ-250/10/0,4. В нормальном режиме загрузка каждого - около 60 %, что обеспечивает сниженные потери и ресурс. В аварийном режиме оставшийся трансформатор несёт 120 %  $S_n$ , что допустимо кратковременно при контроле температуры и возможном ограничении части неприоритетной нагрузки.

На последующем этапе проводится расчёт токов, протекающих в обмотках трансформатора со стороны высокого и низкого напряжения.

«Ток на стороне 10 кВ с учетом допустимой перегрузки:

$$I_{p10кВ} = \frac{1,4S_{Т.НОМ}}{\sqrt{3}U_{ВН}}, \quad (13)$$

$$I_{p10кВ} = \frac{1,4 \cdot 250}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 19,25 \text{ А.}$$

где  $U_{ВН}$  – напряжение на высокой стороне трансформатора, кВ» [20].

«Ток на стороне 0,4 кВ с учетом допустимой перегрузки:

$$I_{p0,4кВ} = \frac{1,4S_{Т.НОМ}}{\sqrt{3}U_{Н}}, \quad (14)$$

$$I_{p0,4кВ} = \frac{1,4 \cdot 250}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 505,2 \text{ А.}$$

где  $U_{Н}$  – напряжение на низкой стороне трансформатора, кВ» [21].

Результаты данного анализа используются при выборе коммутационного и защитного оборудования, а также при проектировании кабельных линий.

Как указано в [1], при проектировании кабельных линий напряжением свыше 1 кВ их подбор производится по условию экономической плотности [22]:

$$S_{\text{э}} = \frac{I_{\text{р10кВ}}}{j_{\text{н}}}, \quad (15)$$
$$S_{\text{э}} = \frac{19,25}{1,2} = 16,04.$$

где  $j_{\text{н}}$  – «нормированная плотность тока равная 1,2 А/мм<sup>2</sup> » [17].

Для дальнейшего монтажа принят кабель марки ААШв 3×16 сечением 16 мм<sup>2</sup>, предназначенный для эксплуатации при напряжении 10 кВ. Конструкция кабеля включает алюминиевые токопроводящие жилы, изоляцию из поливинилхлорида и наружную оболочку, обеспечивающую защиту от влаги и механических повреждений.

В последующем расчёте требуется выполнить проверку кабеля на соответствие допустимому току нагрева по следующему выражению:

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{р10кВ}}, \quad (16)$$
$$75\text{А} \geq 19,25 \text{ А},$$

где  $I_{\text{доп}}$  - длительный допустимый ток выбранного кабеля [10], А.

#### Выводы по разделу 4

В результате расчётов определена требуемая мощность силовых трансформаторов для питания цеха сборки низковольтных комплектных устройств. При расчётной полной мощности предприятия 299,28 кВА принято решение об установке двух трансформаторов ТМГ-250/10/0,4 кВА.

## 5 Расчет токов короткого замыкания

Надежность и безопасность работы электроэнергетических объектов являются одной из главных задач современных систем электроснабжения. Важную роль в обеспечении безопасности играет расчет токов короткого замыкания. Он позволяет не только снизить вероятность аварий, но и правильно подобрать защитное оборудование для работы системы в нештатных условиях.

Короткое замыкание сопровождается возникновением сверхтоков, вызванных непосредственным соединением фазных проводников друг с другом либо с землей при отсутствии сопротивления в месте контакта. Величина таких токов значительно превышает номинальные значения, что приводит к перегрузке сети, риску выхода из строя оборудования и кабельных линий, а также может послужить причиной возгораний и других аварийных ситуаций.

В данном разделе рассматривается методика расчета токов короткого замыкания для цеха сборки низковольтных устройств. Расчеты выполняются на основании нормативных документов [12] с учетом характеристик проектируемой системы. Результаты позволяют определить параметры автоматических выключателей, предохранителей и релейной защиты, необходимых для надежной и безопасной эксплуатации оборудования.

Расчет ведется в относительных единицах, для чего исходные данные приводятся к базисным значениям напряжения и мощности. Для выполнения расчетов составляется расчетная схема электроснабжения (рисунок 6).

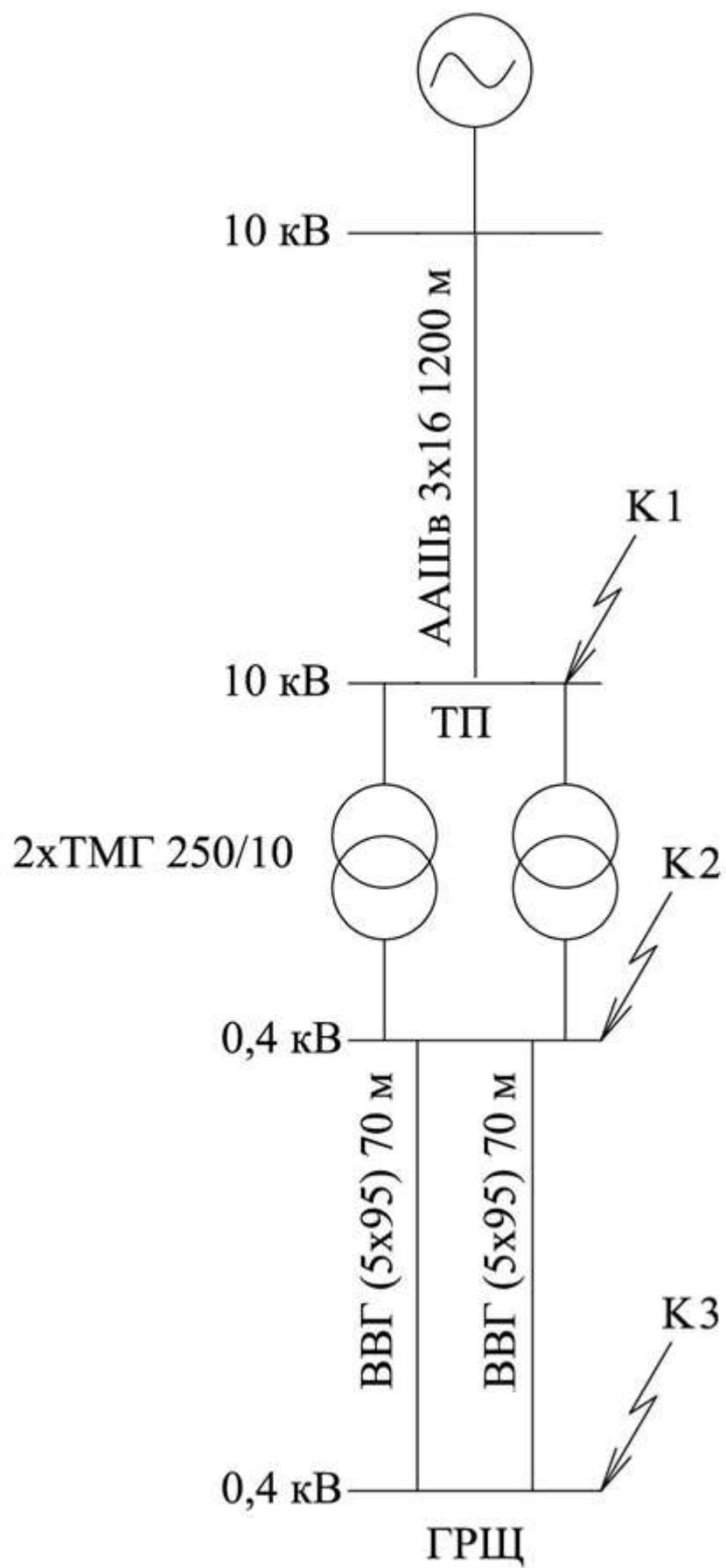


Рисунок 6 – Расчетная схема электроснабжения для расчета токов КЗ

«На базе расчетной схемы разрабатывается схема замещения, позволяющая произвести вычисление токов короткого замыкания при условии максимального режима работы системы электроснабжения (рисунок 7).

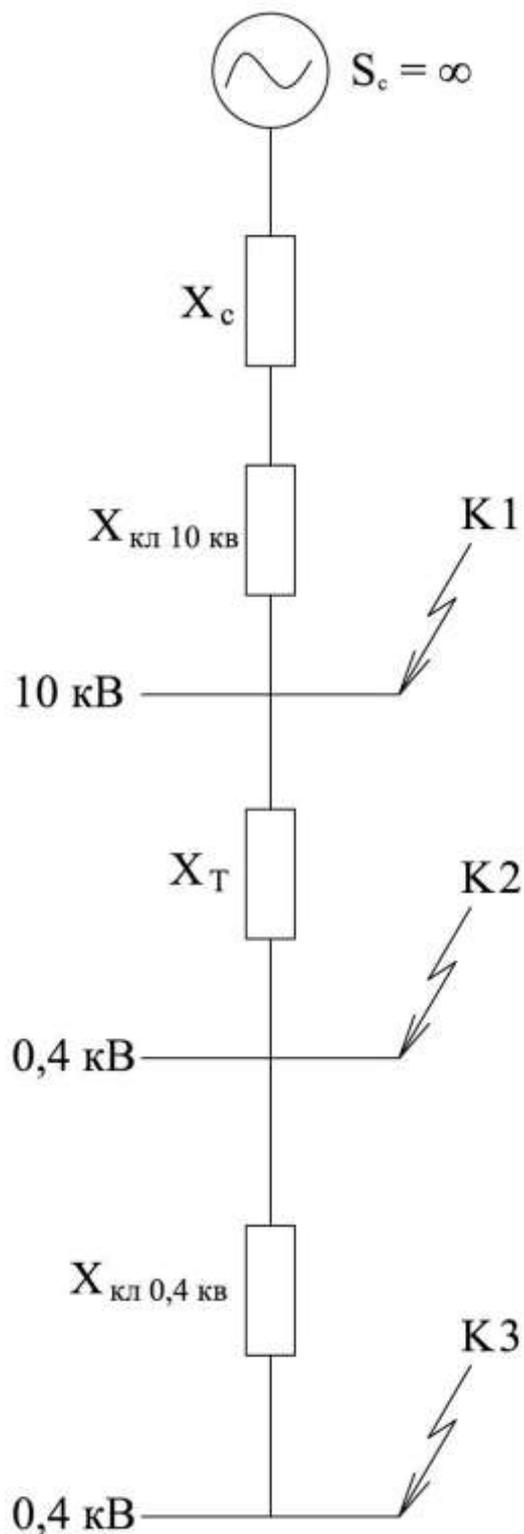


Рисунок 7 – Схема замещения для расчета токов КЗ

Для выполнения расчетов за базисную мощность принимается номинальная мощность трансформаторов, эксплуатируемых на цеховой подстанции:

$$S_6 = 250 \text{ кВА} = 0,25 \text{ МВА.}$$

В расчетной схеме базисные значения напряжений рассчитываются согласно выражению [4]:

$$U_6 = 1,05 \cdot U_{\text{НОМ}}, \text{ кВ.} \quad (17)$$

Расчетная величина определяется на основании формулы (17):

$$U_{61} = 1,05 \cdot 10 = 10,5 \text{ кВ,}$$

$$U_{62} = 1,05 \cdot 0,38 = 0,4 \text{ кВ [1].}$$

На ступенях напряжения 10 и 0,4 кВ базисные токи вычисляются с использованием формулы:

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6}. \quad (18)$$

Расчетная величина определяется на основании формулы (18):

$$I_{61} = \frac{0,25}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 0,014 \text{ кА,}$$

$$I_{62} = \frac{0,25}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 0,361 \text{ кА.}$$

При отсутствии сведений о параметрах системы, согласно [12], сопротивление принимается равным:

$$X_c = 0.$$

Сопротивление линии электропередачи, обеспечивающей питание трансформаторной подстанции, рассчитывается в соответствии с выражением:

$$X_{\text{КЛ}} = x_{\text{овл}} \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_6^2}, \quad (19)$$

$$R_{\text{КЛ}} = r_{\text{окл}} \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_6^2}, \quad (20)$$

где  $x_{\text{овл}}$  - индуктивное сопротивление воздушной линии, Ом/км [13];

$l$  - длина кабельной линии, км;

$r_{\text{окл}}$  - активное сопротивление воздушной линии, Ом/км [4].

Для кабельной линии 10 кВ:

$$X_{\text{КЛ}} = 0,067 \cdot 1,2 \cdot \frac{0,25}{10,5^2} = 1,82 \cdot 10^{-4} \text{ о. е.},$$

$$R_{\text{КЛ}} = 1,95 \cdot 1,2 \cdot \frac{0,4}{10,5^2} = 5,31 \cdot 10^{-3} \text{ о. е.}$$

Величина сопротивления трансформатора определяется на основании методических рекомендаций [22]:

$$X_{\text{трТП}} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{н.тр}}}, \quad (21)$$

$$X_{\text{трТП}} = \frac{4,5}{100} \cdot \frac{0,25}{0,25} = 0,045 \text{ о. е.},$$

где  $U_k$  – напряжение к.з., % [13];

$S_{\text{н.тр}}$  – номинальная мощность трансформатора, МВА [13].

До расчетной точки К1 определяется полное сопротивление системы, а также рассчитывается ток короткого замыкания [6]:

$$Z_{к1} = \sqrt{R_{кЛ}^2 + (X_c + X_{кЛ})^2}, \quad (22)$$

$$Z_{к1} = \sqrt{(5,31 \cdot 10^{-4})^2 + (0 + 1,82 \cdot 10^{-3})^2} = 0,00531 \text{ о. е.},$$

$$I_{к,к1} = \frac{I_{\delta}}{Z_{к1}}, \quad (23)$$

$$I_{к,к1} = \frac{0,014}{0,00531} = 2,637 \text{ кА.}$$

До расчетной точки К2 определяется полное сопротивление системы, а также рассчитывается ток короткого замыкания [13]:

$$Z_{к2} = \sqrt{R_{кЛ}^2 + (X_c + X_{кЛ} + X_{трТП})^2}, \quad (24)$$

$$Z_{к2} = \sqrt{(5,31 \cdot 10^{-3})^2 + (0 + 1,82 \cdot 10^{-4} + 0,045)^2} = 0,455 \text{ о. е.},$$

$$I_{к,к2} = \frac{I_{\delta}}{Z_{к2}}, \quad (25)$$

$$I_{к,к2} = \frac{0,361}{0,0455} = 7,93 \text{ кА.}$$

До расчетной точки К3 определяется полное сопротивление системы, а также рассчитывается ток короткого замыкания [12]:

$$Z_{к3} = \sqrt{(R_{кЛ10} + R_{кЛ0,4})^2 + (X_c + X_{кЛ10} + X_{трТП} + X_{кЛ0,4})^2}, \quad (26)$$

$$Z_{к3} = \sqrt{(5,31 \cdot 10^{-3} + 0,0107)^2 + (0 + 1,82 \cdot 10^{-4} + 0,045 + 4,43 \cdot 10^{-3})^2} \\ = 0,052 \text{ о. е.},$$

$$I_{к,к3} = \frac{I_{\delta}}{Z_{к3}}, \quad (27)$$

$$I_{к,КЗ} = \frac{0,361}{0,052} = 6,93 \text{ кА.}$$

Расчет ударного тока в рассматриваемых точках:

$$i_y = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{к,К} \quad (28)$$

$$i_{y1} = 1,4 \cdot \sqrt{2} \cdot 4,179 = 5,221 \text{ кА,}$$

$$i_{y2} = 1,0 \cdot \sqrt{2} \cdot 7,93 = 11,2 \text{ кА,}$$

$$i_{y3} = 1,0 \cdot \sqrt{2} \cdot 6,93 = 9,8 \text{ кА,}$$

где  $k_y$  - ударный коэффициент» [12].

Итоговые значения, полученные в результате расчетов, систематизированы и приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Итоги расчетов токов короткого замыкания

Точка КЗ	Начальный ток КЗ $I_{к,}$ кА	Ударный ток $i_y$ , кА
К1	2,637	5,221
К2	7,93	11,2
К3	6,93	9,8

#### Выводы по разделу 5

Полученные значения позволяют выполнить проверку электрических аппаратов и проводников, а также выбрать аппараты защиты с соответствующей отключающей способностью. Наибольшие токи КЗ зафиксированы в точках, приближённых к трансформатору (К2 и К3), что подтверждает необходимость применения автоматических выключателей с отключающей способностью не ниже 10 кА.

## 6 Выбор и расчет электрических аппаратов и проводников

Выбор электрических аппаратов и проводников является одним из ключевых этапов проектирования системы электроснабжения, так как именно они обеспечивают надёжность, безопасность и устойчивость работы электроустановок.

### 6.1 Выбор и расчет электрических аппаратов

Электрические аппараты (автоматические выключатели, контакторы, предохранители, выключатели нагрузки, УЗО и др.) служат для управления, защиты и коммутации электрических цепей.

Основные параметры и критерии, учитываемые при выборе автоматических выключателей в сети 0,4 кВ, приведены ниже.

«Выбор номинальных токов автомата и уставок теплового расцепителя осуществляется с учетом следующих условий:

$$I_{н.авт} \geq I_{р,} \quad (29)$$

$$I_{у.т.р.} \geq 1,1I_{р,} \quad (30)$$

где  $I_{н.авт}$  – номинальный ток автомата, А;

$I_{у.т.р.}$  – уставка теплового расцепителя автоматического выключателя, А» [6].

«Ток электромагнитного расцепителя:

$$I_{у.э.р.} \geq K_{т.о.} \cdot I_{р,} \quad (31)$$

где  $K_{т.о.}$  – кратность срабатывания токовой отсечки» [6].

Результаты выбора защитных аппаратов сведены в таблицу 8.

Таблица 8 – Выбор защитных устройств

Узел питания	ЭП	$I_p$ , А	$1,1I_p$ , А	Тип выключателя	$I_{ном.а}$ , А	$I_{у.т.р.}$ , А	$I_{у.э.р.}$ , А
Вводной АВ ТП	-	431,97	475,17	ВА 52-39 [1]	630	630	6300
Секционный АВ ТП	-	215,985	237,58	ВА 52-39	630	400	4000
Вводной АВ ГРЩ	-	184,33	202,76	ВА 52-35	630	250	2500
Секционный АВ ГРЩ	-	92,165	101,38	ВА 52-35	630	200	2000
ТП	ГРЩ	184,33	202,76	ВА 52-39	630	320	3200
ГРЩ	ЩС-1	66,66	73,33	ВА 51-31	250	80	800
ГРЩ	ЩС-2	55,8	61,38	ВА 51-31	100	63	630
ГРЩ	ЩС-3	6,34	6,97	ВА 51-25	25	16	160
ГРЩ	ЩИ	7,3	8,03	ВА 51-25	25	16	160
ГРЩ	ЩВ	55,9	61,49	ВА 51-31	100	63	630
ГРЩ	ЩО	27,57	30,33	ВА 51-31	100	32	320
ЩС-1	Ленточнопильный станок (1)	14,43	15,87	ВА 51-25	25	16	160
ЩС-1	Сверлильный станок (2,3)	13,32	14,65	ВА 51-25	25	16	160
ЩС-1	Кран-балка (4)	22,85	25,14	ВА 51-31	100	32	320
ЩС-1	Гильотина для резки листового металла (5)	21,65	23,82	ВА 51-25	25	25	250
ЩС-1	Гидравлический пресс для гибки металла (6)	27,06	29,77	ВА 51-31	100	32	320
ЩС-1	Точильно-шлифовальный станок (7)	12,63	13,89	ВА 51-25	25	16	160
ЩС-1	Верстак со встроенной системой освещения (8,9)	1,92	2,11	ВА 51-25	25	12,5	125
ЩС-2	Электрический шуруповёрт (зарядная станция) (10,11,12)	2,44	2,68	ВА 51-25	25	12,5	125
ЩС-2	Сварочный полуавтоматический аппарат (13)	15,88	17,47	ВА 51-25	25	20	200
ЩС-2	Паяльная станция (14,15)	9,88	10,87	ВА 51-25	25	12,5	125
ЩС-2	Станок лазерной маркировки (16)	23,77	26,15	ВА 51-31	100	32	320
ЩС-2	Кран-балка (26)	38,49	42,34	ВА 51-31	100	50	500

Продолжение таблицы 8

Узел питания	ЭП	$I_p, A$	$1,1I_p, A$	Тип выключателя	$I_{ном.а}, A$	$I_{у.т.р}, A$	$I_{у.э.р}, A$
ЩС-3	Монтажный стол с освещением и розетками (17,18,19)	1,76	1,94	ВА 51-25	25	12,5	125
ЩС-3	Электрический монтажный инструмент (многофункциональный комплект) (20,21)	1,78	1,96	ВА 51-25	25	12,5	125
ЩС-3	Станок для резки и зачистки проводов (22)	4,33	4,76	ВА 51-25	25	12,5	125
ЩИ	Стенд для электрических испытаний (нагрузочный стенд) (23)	3,74	4,11	ВА 51-25	25	12,5	125
ЩИ	Испытательный стенд измерения сопротивления изоляции (24)	2,89	3,18	ВА 51-25	25	12,5	125
ЩИ	Система компьютеризированного контроля и учета (25)	1,87	2,06	ВА 51-25	25	12,5	125
ЩВ	Приточный вентилятор (27)	30,57	33,63	ВА 51-31	100	40	400
ЩВ	Вытяжной вентилятор (28)	37,36	41,1	ВА 51-31	100	50	500

Выбранные автоматические выключатели обеспечивают: защиту кабелей и шин по току нагрузки и при КЗ, соответствие отключающей способности расчётным токам КЗ в точках установки, селективность (ступенчатое отключение при аварии), удобство эксплуатации и возможность резервирования.

## 6.2 Выбор и расчет проводников

Кабельные линии напряжением 0,4 кВ служат для соединения главного распределительного щита (ГРЩ) с пунктами питания (ЩС1, ЩС2, ЩС3, ЩО, ЩВ, ЩИ), а также для присоединения ГРЩ к трансформаторной подстанции.

При проектировании кабельных линий учитываются:

- расчётный ток нагрузки, определяемый по мощности приёмников;
- допустимая длительная токовая нагрузка кабеля, зависящая от сечения жил, материала проводника и способа прокладки (по ПУЭ, табл. 1.3.6, 1.3.10);
- падение напряжения - не более 5 % от номинального значения;
- категория пожарной безопасности - предпочтительно кабели с индексом нг-LS (не распространяющие горение, с низким дымо- и газовыделением).

В качестве базового варианта принимаются кабели марки ВВГнг-LS.

Для примера расчёта и выбора кабельной линии рассмотрен ЩС1.

Расчётный ток этого щита составляет 55,8 А.

Предварительно выбран кабель ВВГ (5×16) с поперечным сечением 16 мм<sup>2</sup> и длительно допустимым током  $I_{\text{доп}}$  75 А.

Далее кабель проверяется по условию:

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{рЩС1}}, \quad (32)$$

$$75 \text{ А} \geq 55,8 \text{ А}.$$

где  $I_{\text{доп}}$  – длительно допустимый ток проводника [6], А.

Проверка показала, что рассматриваемое условие выполнено, а значит, выбранный кабель удовлетворяет необходимым требованиям. На следующем этапе выполняется проверка допустимой потери напряжения, что позволяет подтвердить правильность его выбора.

«Величина падения напряжения в линии определяется по выражению:

$$\Delta U_{\%} = \frac{P_{\text{ЩС1}} \cdot r_0 \cdot l + Q_{\text{ЩС1}} \cdot x_0 \cdot l}{10U_{\text{н}}^2}, \quad (33)$$

$$\Delta U_{\%} = \frac{36,82 \cdot 1,16 \cdot 0,075 + 28,127 \cdot 0,095 \cdot 0,075}{10 \cdot 0,4^2} = 0,719\%,$$

где  $r_0$  - удельное активное сопротивление кабельной линии [9],

Ом/км;

$l$  - длина кабельной линии, км;

$x_0$  - удельное индуктивное сопротивление кабельной линии [9], Ом/км;

$U_H$  - напряжение сети, кВ» [9].

Потеря напряжения соответствует норме, т.е. не превышает допустимых 5% [10].

Для оставшихся питающих линий расчеты выполняются аналогичным образом, результаты приводятся в таблице 9.

Таблица 9 – Итого потери по пунктам питания

Наименование оборудования	Расчетный ток группы, А	$I_{доп}$ , А	Марка кабеля	L, м	$r_0$ , Ом/км	$x_0$ , Ом/км	$\Delta U$ , %
ГРЩ	184,33	2×220	ВВГ 2(4×95)	70	0,195	0,81	4,133
ЩС-1	66,66	95	ВВГ (5×25)	12	1,16	0,095	0,339
ЩС-2	55,8	75	ВВГ (5×16)	29	1,16	0,095	0,719
ЩС-3	6,34	19	ВВГ (5×1,5)	5,5	12,3	0,126	0,14
ЩИ	7,3	19	ВВГ (5×1,5)	26	12,3	0,126	0,91
ЩВ	55,9	75	ВВГ (5×16)	4,5	1,16	0,095	0,11
ЩО	27,57	35	ВВГ (5×4)	19	4,63	0,107	1,05

Определение расчётных токов по линиям:

$$I_{лин} = \frac{P_{наг.}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi}, \quad (34)$$

где  $P_{наг.}$  - активная мощность нагрузки, кВт;

$U$  - линейное напряжение, кВ;

$\cos\varphi$  - коэффициент мощности [1].

В таблице 10 приведены расчеты для распределительных линий.

Таблица 10 – Распределительные линии

Наименование оборудования	Расчетный ток группы, А	$I_{доп}$ , А	Марка кабеля	L, м	$r_0$ , Ом/км	$x_0$ , Ом/км	$\Delta U$ , %
ЩС-1							
Ленточнопильный станок (1)	14,43	19	ВВГ (5×1,5)	5	12,3	0,126	0,2
Сверлильный станок (2,3)	13,32	19	ВВГ (5×1,5)	10	12,3	0,126	0,6
Кран-балка (4)	22,85	25	ВВГ (5×2,5)	11	7,4	0,116	1,6
Гильотина для резки листового металла (5)	21,65	25	ВВГ (5×2,5)	12	7,4	0,116	2,6
Гидравлический пресс для гибки металла (6)	27,06	35	ВВГ (5×4)	13	4,63	0,107	3,6
Точильно-шлифовальный станок (7)	12,63	19	ВВГ (5×1,5)	14	12,3	0,126	4,6
Верстак со встроенной системой освещения (8,9)	1,92	19	ВВГ (5×1,5)	15	12,3	0,126	5,6
ЩС-2							
Электрический шуруповёрт (зарядная станция) (10,11,12)	2,44	19	ВВГ (5×1,5)	6	12,3	0,126	0,2
Сварочный полуавтоматический аппарат (13)	15,88	19	ВВГ (5×1,5)	8	12,3	0,126	0,4
Паяльная станция (14,15)	9,88	19	ВВГ (5×1,5)	12	12,3	0,126	0,9
Станок лазерной маркировки (16)	23,77	25	ВВГ (5×2,5)	14	7,4	0,116	0,1
Кран-балка (26)	38,49	42	ВВГ (5×6)	16	3,09	0,1	1,2
ЩС-3							
Монтажный стол с освещением и розетками (17,18,19)	1,76	19	ВВГ (5×1,5)	13	12,3	0,126	0,3
Электрический монтажный инструмент (многофункциональный комплект) (20,21)	1,78	19	ВВГ (5×1,5)	10	12,3	0,126	0,3

Продолжение таблицы 10

Наименование оборудования	Расчетный ток группы, А	$I_{\text{доп}}$ , А	Марка кабеля	L, м	$r_0$ , Ом/км	$x_0$ , Ом/км	$\Delta U$ , %
Станок для резки и зачистки проводов (22)	4,33	19	ВВГ (5×1,5)	36	12,3	0,126	1,3
ЩИ							
Стенд для электрических испытаний (нагрузочный стенд) (23)	3,74	19	ВВГ (5×1,5)	13	12,3	0,126	0,3
Испытательный стенд измерения сопротивления изоляции (24)	2,89	19	ВВГ (5×1,5)	10	12,3	0,126	0,3
Система компьютеризированного контроля и учета (25)	1,87	19	ВВГ (5×1,5)	36	12,3	0,126	1,3
ЩВ							
Приточный вентилятор (27)	30,57	35	ВВГ (5×4)	13	4,63	0,107	0,3
Вытяжной вентилятор (28)	37,36	42	ВВГ (5×6)	10	3,09	0,1	0,3

После расчёта нагрузок оборудования и станков определены расчётные токи и выбраны сечения кабелей 0,4 кВ. Применение кабелей марки ВВГнг-LS с медными жилами обеспечивает:

- соответствие токовым нагрузкам;
- допустимое падение напряжения  $\leq 5\%$ ;
- пожаробезопасность (нг-LS).

Выводы по разделу 6

В разделе выполнен выбор и расчёт электрических аппаратов и проводников системы электроснабжения цеха. Подобраны автоматические выключатели по номинальному току нагрузки, отключающей способности и характеристикам срабатывания, что обеспечивает селективность и надёжную защиту линий. Проведён выбор кабельных линий с учётом длительно допустимых токов и падения напряжения.

## **7 Выбор основного электрооборудования и его проверка**

### **7.1 Конструктивные решения для трансформаторной подстанции**

В качестве источника электроснабжения проектируемого цеха сборки низковольтных комплектных устройств принята комплектная трансформаторная подстанция (КТП) блочно-модульного исполнения. Данное решение обеспечивает быстроту монтажа, компактность и заводскую готовность оборудования, что снижает сроки строительства и повышает надёжность эксплуатации.

Подстанция размещается на расстоянии около 0,7 км от цеха, что обуславливает применение протяжённой кабельной линии от питающей сети до проектируемого объекта.

Конструктивное исполнение: блочно-модульное здание заводского изготовления, состоящее из трёх основных отсеков:

- отсек высоковольтных ячеек (ВН);
- отсек силовых трансформаторов;
- отсек низковольтного распределительного устройства (НН).

Для приёма и распределения электрической энергии напряжением 10 кВ предусмотрены комплектные ячейки серии КСО-298М [5]. Каждая ячейка включает:

- выключатель нагрузки ВНА-СЭЩ, обеспечивающий коммутацию под нагрузкой;
- предохранительные устройства ПКТ-103, выполняющие защиту трансформаторов от токов короткого замыкания и перегрузок;
- ограничители перенапряжения ОПН-П, защищающие оборудование от грозовых и коммутационных перенапряжений;
- трансформаторы тока и напряжения для учёта и релейной защиты.

Для распределения электроэнергии низкого напряжения применены ячейки на базе НКУ-СЭЩ-М, которые включают:

- вводные и секционные автоматические выключатели (с функцией АВР);
- отходящие линии к ГРЩ цеха и сторонним потребителям;
- устройства защиты, управления и контроля;
- возможность установки компенсирующих устройств (УКРМ) на шинах 0,4 кВ.

В таблице 11 представлены основные параметры ячейки КСО-298М.

Таблица 11 – Основные параметры ячейки КСО-298М [5]

Параметр	Значение
Номинальное напряжение, кВ	10,5
Номинальный ток сборных шин, А	630
Ток термич. стойкости шкафов, кА	20
Степень защиты оболочки	IP20
Оперативный ток	Переменный 220 В
Тип обслуживания	Одностороннее
Материал СШ	Алюминий (Al)
Материал ошиновки главных цепей	Алюминий (Al)
Окраска шкафов (двери/лотки)	RAL 7032

Принятая конструктивная схема трансформаторной подстанции в блочно-модульном исполнении с использованием ячеек КСО-298М на стороне 10 кВ и НКУ-СЭЩ-М на стороне 0,4 кВ обеспечивает надёжное и безопасное электроснабжение цеха. Применение выключателей нагрузки ВНА-СЭЩ, предохранителей ПКТ-103 и ограничителей перенапряжений ОПН-П гарантирует защиту оборудования от аварийных режимов и перенапряжений.

## 7.2 Проверка выключателя нагрузки и предохранителя

Выключатель нагрузки - это коммутационный аппарат, предназначенный для включения и отключения цепей под нагрузкой, но не рассчитанный на отключение токов короткого замыкания.

Для корректного выбора и проверки силовых выключателей необходимо учитывать ряд условий, которые перечислены ниже.

«По номинальному напряжению [17]:

$$U_{\text{уст}} \leq U_{\text{н}}; \quad (35)$$

где  $U_{\text{уст}}, U_{\text{н}}$  - соответственно напряжения установки и номинальное напряжение выключателя, кВ [17].

По максимальному рабочему току:

$$I_{\text{раб.макс.}} \leq I_{\text{н}}. \quad (36)$$

где  $I_{\text{раб.макс.}}, I_{\text{н}}$  - соответственно максимальный рабочий ток ПАВ режима электроустановки и номинальное значение тока выключателя, А.

«Проверка коммутационных аппаратов на симметричные токи отключения [17]:

$$I_{\text{п.т}} \leq I_{\text{отк.ном}}. \quad (37)$$

где  $I_{\text{п.т}}$  - значение периодической составляющей тока короткого замыкания в момент начала расхождения дугогасительных контактов [6];

$I_{\text{отк.ном}}$  - номинальный ток отключения выбранного выключателя, кА» [6].

«Для аппаратов с функцией отключения аperiodическая составляющая тока короткого замыкания в процессе проведения данной работы проверяется на отключение» [6]:

$$i_{\text{а.т}} \leq i_{\text{а.ном}} = \sqrt{2} \cdot \beta_{\text{ном}} \cdot I_{\text{отк.ном}}, \quad (38)$$

где  $\beta_{\text{ном}}$  - «номинальное значение относительного содержания

апериодической составляющей в отключаемом токе [6];

$i_{a.ном}$  – номинальное допустимое значение апериодической составляющей в отключаемом токе для времени [6].

По величине ударного тока [17]:

$$i_y \leq i_{дин.} \quad (39)$$

где  $i_{дин.}$  – номинальный ток электродинамической стойкости аппарата [6].

Проведение испытаний электрических устройств на термостойкость [1]:

$$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T, \quad (40)$$

где  $I_T$  – предельный ток термической стойкости по каталогу [6];

$t_T$  – длительность протекания тока термической стойкости, с» [17].

Результаты расчетов и испытаний выключателя приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Результаты расчетов выключателя ВНА-СЭЦ 10 [5]

Условия проверки	Расчетные показатели сети	Паспортные данные устройства
$U_{уст} \leq U_H$	$U_{уст} = 10 \text{ кВ}$	$U_H = 10 \text{ кВ}$
$I_{раб.макс.} \leq I_H$	$I_{раб.макс.} = 19,25 \text{ А}$	$I_H = 630 \text{ А}$
$I_{п.т} \leq I_{отк.ном}$	$I_{п.т} = 2,637 \text{ кА}$	$I_{отк.ном} = 20 \text{ кА}$
$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 5,221 \text{ кА}$	$i_{дин.} = 52 \text{ кА}$
$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T$	$B_K = 23.25 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_T^2 \cdot t_T = 1200 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

Таким образом, выбранный выключатель нагрузки обеспечивает требуемую надёжность и безопасную эксплуатацию высоковольтной части трансформаторной подстанции.

В конструкции ячеек распределительного устройства 10 кВ трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ помимо высоковольтных выключателей предусматривается установка предохранителей ПКТ-103, выполняющих функцию защиты оборудования. Результаты их выбора и проведённых испытаний систематизированы и представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Результаты расчетов и проверки предохранителей ПКТ-103 [1]

Условия проверки	Расчетные показатели сети	Паспортные данные устройства
$U_{уст} \leq U_n$	$U_{уст} = 10$ кВ	$U_n = 10$ кВ
$I_{раб.макс.} \leq I_n$	$I_{раб.макс.} = 19,25$ А	$I_n = 31,5$ А
$I_{п.т} \leq I_{отк.ном}$	$I_{п.т} = 2,637$ кА	$I_{отк.ном} = 12,5$ кА
$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 5,221$ кА	$i_{дин.} = 52$ кА

Применение предохранителей ПКТ-103 с номиналом плавкой вставки 31,5 А обеспечивает:

- надёжную защиту трансформаторов ТМГ-250/10/0,4 от токов КЗ;
- ограничение ударного тока до допустимых значений;
- согласованную работу с выключателями нагрузки ВНА-СЭЩ;
- соответствие требованиям по коммутационной и термической стойкости.

Выводы по разделу 7

В результате проектирования выполнен выбор основного оборудования трансформаторной подстанции и распределительных устройств. На стороне высокого напряжения приняты ячейки КСО-298М, укомплектованные выключателями нагрузки ВНА-СЭЩ, предохранителями ПКТ-103 и ограничителями перенапряжений ОПН-П, что обеспечивает безопасную и селективную работу при нормальных и аварийных режимах. На стороне низкого напряжения применены распределительные устройства на базе НКУ-СЭЩ-М, позволяющие организовать ввод, секционирование и питание всех отходящих линий.

## 8 Выбор устройств релейной защиты

Релейная защита является одним из ключевых элементов систем электроснабжения, обеспечивая селективное отключение повреждённых участков сети при коротких замыканиях, перегрузках, нарушениях режима и аномалиях параметров. Основные задачи релейной защиты:

- быстрое выявление аварийного режима (токи КЗ, перегрузки, асимметрия фаз, замыкания на землю);
- избирательное отключение повреждённого участка без отключения исправных элементов;
- обеспечение надёжности и устойчивости работы энергосистемы;
- минимизация последствий аварии (повреждений оборудования, перерывов питания).

Основные принципы:

- надёжность - срабатывание при всех видах повреждений;
- быстрдействие - минимальное время отключения;
- избирательность (селективность) - отключение только повреждённого участка;
- чувствительность - реагирование на аварии при минимальных уровнях повреждений;
- простота и удобство эксплуатации.

Современные системы релейной защиты выполняются на базе микропроцессорных терминалов. По сравнению с электромеханическими и статическими реле они обладают рядом преимуществ:

- высокая точность измерений и гибкость настройки уставок;
- возможность интеграции в АСУ ТП и системы телемеханики;
- функция самодиагностики и протоколирования аварийных событий;
- совмещение нескольких видов защит в одном устройстве (токовые, дифференциальные, дистанционные, направленные защиты);

- уменьшение количества кабельных соединений за счёт применения цифровых шин (МЭК 61850).

В проектируемой системе релейная защита будет выполнена на базе микропроцессорных устройств серии «Орион-2», разработанных НПО «ЭКРА».

Основные характеристики терминалов «Орион-2»:

широкий набор встроенных защит: токовые отсечки (МТЗ, ТО), защита от перегрузки, защита от однофазных замыканий на землю, защита по напряжению (минимальное/максимальное), автоматическое повторное включение (АПВ), автоматический ввод резерва (АВР);

возможность работы в системах с напряжением 6–35 кВ;

дискретные и аналоговые входы/выходы для управления выключателями и сигнализацией;

функция регистрации аварийных событий и осциллографирования.

Применение микропроцессорных терминалов «Орион-2» в трансформаторной подстанции обеспечивает:

- высокую скорость и точность обнаружения аварийных режимов;
- селективное отключение повреждённых элементов сети;
- возможность централизованного мониторинга и удалённой диагностики;
- снижение эксплуатационных затрат за счёт интеграции в систему верхнего уровня;
- надёжную защиту трансформаторов, кабельных линий и распределительных устройств.

Внешний вид устройства «Орион-2» показан на рисунке 8.



Рисунок 8 – Внешний вид устройства «Орион-2»

«Защита блока «Линия - Трансформатор» ТП реализуется с помощью двухступенчатой токовой защиты. Первая ступень - селективная отсечка, отстроенная от максимального трёхфазного замыкания на стороне 0,4 кВ, вторая - максимальная токовая защита с выдержкой времени, учитывающей бросок намагничивающего тока трансформатора. Дополнительно устанавливается защита от однофазных замыканий на землю. Расчёт выполнен для блока «Линия - Трансформатор»» [16].

«Селективная отсечка.

Ток срабатывания селективной отсечки:

$$I_{c.o} \geq K_H \cdot I_{кз}^{(3)}, \quad (41)$$

где  $K_H$  - коэффициент надёжности токовой отсечки [16];

$I_{кз}^{(3)}$  - максимальный ток короткого трёхфазного замыкания на стороне 10 кВ, кА.

Тогда ток срабатывания отсечки равен:

$$I_{c.o} = 1,05 \cdot 2367 = 2485,3 \text{ А.}$$

К установке выбран трансформатор тока ТОЛ с коэффициентом трансформации 75/5.

Значение тока срабатывания микропроцессорного реле:

$$I_{cp} = \frac{K_{cx} \cdot I_{c.o.}}{K_1}, \quad (42)$$

где  $K_{cx}$  - коэффициент схемы соединения трансформаторов тока [16];  
 $K_1$  - коэффициент трансформации ТТ.

Величина тока, при котором срабатывает микропроцессорное реле, равен:

$$I_{cp} = \frac{1 \cdot 2485,3}{15} = 165,69 \text{ А.}$$

Максимальная токовая защита (МТЗ).

Для трансформатора Т1 максимальная токовая защита (МТЗ) настраивается с отстройкой от его номинального тока. В данном случае коэффициент самозапуска принимается равным 1,4 [16]. Определение тока срабатывания защиты производится по следующей формуле:

$$I_{cp} = \frac{k_H \cdot k_{сзн}}{k_B} \cdot I_{\text{раб.мах}}, \quad (43)$$

где  $k_{сзн}$  - коэффициент самозапуска [16];

$k_{в}$  - коэффициент возврата [16].

Ток срабатывания защиты определяется выражением:

$$I_{ср} = \frac{1,05 \cdot 1,4}{0,97} \cdot 19,25 = 29,17 \text{ А.}$$

Ток срабатывания микропроцессорного реле, рассчитанный по (42), составляет:

$$I_{ср} = \frac{1 \cdot 29,17}{15} = 1,94 \text{ А.}$$

Коэффициент чувствительности при коротком замыкании в основной зоне действия защиты:

$$K_{ч} = \frac{0,87 \cdot I_{кз}^{(3)}}{I_{с.з}}, \quad (44)$$

где  $I_{кз}^{(2)}$  - значение тока двухфазного короткого замыкания, А.

Таким образом коэффициент чувствительности равен:

$$K_{ч} = \frac{0,87 \cdot 4179}{29,17} = 70,6 > 15.$$

Выдержку времени защиты:

$$t_{с.з.W} = t_{с.з2} + \Delta t, \quad (45)$$
$$t_{с.з.W} = 0,75 + 05 = 1,25 \text{ с.}$$

где  $t_{с.з2}$  - время срабатывания вводного автоматического выключателя, с;  
 $\Delta t$  - ступень селективности, с» [16].

Выводы по разделу 8.

В качестве релейной защиты для проектируемой трансформаторной подстанции выбраны современные микропроцессорные устройства серии «Орион-2». Эти терминалы обеспечивают комплексную защиту трансформаторов, кабельных линий и распределительных устройств на стороне 6–10 кВ, включая токовые защиты, защиту от перегрузки, замыканий на землю, минимального и максимального напряжения, а также функции АПВ и АВР.

Применение микропроцессорных устройств позволяет повысить надёжность и быстродействие защит, обеспечить селективность отключения повреждённых участков сети и интеграцию в систему диспетчеризации. Таким образом, выбранные устройства релейной защиты полностью соответствуют современным требованиям [8], обеспечивая безопасную и эффективную работу электроснабжения предприятия.

## Заключение

Выпускная квалификационная работа была посвящена проектированию системы электроснабжения цеха сборки низковольтных комплектных устройств ООО «Ди Групп». В процессе выполнения работы была проанализирована современная практика проектирования систем электроснабжения промышленных предприятий, выявлены её недостатки и сформулированы пути их устранения.

В ходе работы были достигнуты следующие результаты:

- проведён анализ исходных данных по предприятию и охарактеризован проектируемый цех;
- выполнен расчёт электрических нагрузок и произведено распределение приёмников по пунктам питания;
- произведён светотехнический расчёт освещения цеха, подобраны современные энергоэффективные светодиодные светильники;
- рассчитаны и выбраны кабельные линии 0,4 кВ с учётом длительно допустимых токов, термической стойкости и падения напряжения;
- произведён выбор и расчёт электрических аппаратов, проверено соответствие номинальных токов автоматических выключателей допустимым токам кабелей;
- рассчитаны токи короткого замыкания в характерных точках сети и проведена проверка оборудования на коммутационную, тепловую и динамическую стойкость;
- выбраны и проверены силовые трансформаторы ТМГ-250/10/0,4, обеспечивающие надёжное питание предприятия при нормальных и аварийных режимах;
- разработаны конструктивные решения трансформаторной подстанции блочно-модульного исполнения с использованием ячеек КСО-298М на стороне 10 кВ и НКУ-СЭЩ-М на стороне 0,4 кВ;

- выбраны устройства релейной защиты на базе микропроцессорных терминалов «Орион-2», обеспечивающих высокую надёжность и селективность отключения повреждённых участков сети;
- предусмотрены мероприятия по компенсации реактивной мощности для повышения энергоэффективности системы.

Поставленная цель работы - спроектировать систему электроснабжения цеха, обеспечивающую надёжность, безопасность и экономическую эффективность - достигнута в полном объёме.

Практическая значимость выполненной работы заключается в возможности её применения при модернизации действующих и проектировании новых промышленных объектов. Полученные расчёты и проектные решения могут использоваться как в учебных целях, так и для реализации реальных инженерных проектов в области промышленного электроснабжения.

## Список используемой литературы и используемых источников

1. Выключатели автоматические ВА. [Электронный ресурс]: URL: <https://www.nmz.ru/predpriytii/80-vyklyuchateli-avtomaticheskie> (дата обращения: 01.09.2025).
2. ГОСТ Р 55710-2013 Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений [Электронный ресурс]: утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 08.11.2013 N 1364-ст. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200105707> (дата обращения: 01.09.2025).
3. Гуревич Ю.Е. Особенности электроснабжения промышленного потребителя. Москва: Торус Пресс, 2019. 408 с.
4. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением ниже 1 кВ [Электронный ресурс]: ГОСТ 28249-93 утв. приказом от 21.10.1993. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-28249-93> (дата обращения: 01.09.2025).
5. Кадомская К.П., Лавров Ю.А. Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Вологда: Инфра-Инженерия, 2018. 343 с.
6. Конюхова Е. А. Электроснабжение объектов: Учебное пособие. М.: Academia, 2013. 320 с.
7. Кнорринг Г.М., Фадин И.М., Сидоров В.Н. Справочная книга для проектирования электрического освещения: Учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: Энергоатомиздат, 1992. – 650 с.
8. ПУЭ 7. Правила устройства электроустановок. Издание 7 нормы [Текст]. – Введ. 2003 – 01 – 01. – М. : ЗАО «Энергосервис», 1998. – 980 с.
9. Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электроэнергетических специальностей / Под редакцией В.М.Блок. М.: Высшая школа, 1981. 304 с.
10. Расчет сетей по потерям напряжения [Электронный ресурс]: интернет-сайт. URL: <http://electricalschool.info/main/elsnabg/905-raschet-setejjpo-poterjam-naprjazhenija.html> (дата обращения 01.09.2025).

11. Рогалев Н.Д. Энергосбережение: учебное пособие для ВУЗов. Москва: МЭИ, 2020. 242 с.
12. РД 153-34.0-20.527-98 Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования// Консультант плюс: справочно-правовая система.
13. Рожкова Л.Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций: Учебник для студентов учреждений среднего профессионального образования. М.: ИЦ Академия, 2018. 448 с.
14. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение [Электронный ресурс]: Свод правил. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 увт. Приказом Минстроя России от 07.11.2016 N 777/пр. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456054197> (дата обращения: 01.09.2025).
15. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1995. 528 с.
16. Сазонов Ю.Н. Автоматизация электроснабжения. Санкт-Петербург: Питер, 2014. 320 с.
17. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. 4-е изд., перераб. и доп. М.: ЭНАС, 2012. 312 с.
18. Сивков А. А., Сайгаш А. С., Герасимов Д. Ю. Основы электроснабжения: Учебное пособие. М.: Юрайт, 2016. 174 с.
19. Суворин А. В. Электрические схемы электроустановок. Составление и монтаж: Практическое пособие. М.: Феникс, 2015. 544 с.
20. Сибикин Ю.Д. Пособие к курсовому и дипломному проектированию электроснабжения промышленных, сельскохозяйственных и городских объектов. Учебное пособие. М.: Форум, Инфра-М, 2019. 384 с.
21. Хорольский В. Я., Таранов М. А. Надежность электроснабжения: Учебное пособие. М.: ДРОФА, 2013. 128 с.
22. Шлейников В.Б. Электроснабжение цеха промышленного предприятия. Оренбург: ОГУ, 2012. 115 с