

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 Разработка системы электроснабжения тепличного хозяйства

Обучающийся

М.Д. Поршнев

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н. В.И. Платов

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

Тольятти 2025

## **Аннотация**

Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения надежного и экономичного электроснабжения современных тепличных хозяйств, требующих стабильной подачи энергии для поддержания микроклимата и работы оборудования. В данной работе представлены результаты комплексного проектирования системы электроснабжения тепличного предприятия. В ходе исследования определены расчетные электрические нагрузки объекта, обоснован выбор оптимальной мощности силового трансформатора, рассчитаны токи короткого замыкания и на их основе выбрана защитно-коммутационная аппаратура. Дополнительно разработаны и проанализированы предложения по интеграции ветросолнечной электростанции для повышения энергоэффективности и автономности тепличного хозяйства.

Данная ВКР содержит пояснительную записку объемом 75 страниц, дополняемой 13 таблицами, 5 рисунками, а также 6 чертежами формата А1.

## Содержание

Введение .....	4
1 Определение целей, задач и направлений исследований.....	6
1.1 Общая характеристика предприятия .....	6
1.2 Анализ требований к электроснабжению объекта .....	11
1.3 Анализ возможностей электроснабжения с учетом местных условий	13
1.4 Формулировка целей, задач и направлений исследований.....	15
2 Разработка системы электроснабжения .....	18
2.1 Расчет электрических нагрузок .....	18
2.2 Разработка схемы электроснабжения.....	25
2.3 Выбор трансформаторов, кабелей и коммутационного оборудования	29
2.4 Расчет токов КЗ и разработка системы РЗА .....	50
2.5 Разработки предложений по использованию ветросолнечной электростанции.....	61
3. Обеспечение надежности и безопасности хозяйства .....	66
3.1 Разработка системы освещения.....	66
3.2 Молниезащита объекта .....	68
Заключение .....	71
Список используемых источников.....	73

## Введение

Электроснабжение объектов выделяется как критически важный сегмент, оказывающий непосредственное влияние на эффективность и бесперебойность функционирования всей экономической системы. Надежное и качественное электроснабжение является основополагающим фактором для обеспечения бесперебойной работы оборудования, поддержания заданных параметров производственных процессов и, в конечном итоге, достижения планируемых экономических показателей предприятия.

Электроснабжение объектов неразрывно связано с технологическими процессами предприятия и подчиняется строгим нормам и стандартам энергопотребления. В условиях непрерывного технологического обновления и модернизации производственных мощностей, включая расширение площадей, внедрение нового оборудования и автоматизированных систем управления, системы электроснабжения должны обладать высокой степенью адаптивности и гибкости.

В современных промышленных условиях системы электроснабжения призваны обеспечивать не только постоянную подачу электроэнергии к различным типам потребителей, но и минимизировать электрические потери. Снижение потерь электроэнергии достигается за счет применения современных энергоэффективных технологий, оптимизации режимов работы электрооборудования, а также внедрения систем компенсации реактивной мощности. Это позволяет существенно снизить эксплуатационные затраты и повысить экономическую эффективность предприятия в целом.

Настоящая работа посвящена разработке системы электроснабжения для предприятия тепличного хозяйства. В рамках поставленной задачи необходимо решить следующий комплекс вопросов:

- определение расчетных нагрузок тепличного хозяйства;
- выбор оптимальной мощности трансформатора;
- определение токов короткого замыкания и выбор защитной

аппаратуры;

- разработка предложений по использованию ветросолнечной электростанции.

Каждый из перечисленных этапов является неотъемлемой частью проектирования эффективной и безопасной системы электроснабжения. Объект проектирования: предприятие тепличного хозяйства. Предмет проектирования: система электроснабжения.

В процессе разработки проекта использовались действующие технические нормативы, справочная литература и каталоги электрооборудования. Дальнейшее изложение материала будет построено в соответствии с логикой проектирования систем электроснабжения, начиная с характеристики электрических приемников и заканчивая выводами и рекомендациями по дальнейшей эксплуатации разработанной системы.

# 1 Определение целей, задач и направлений исследований

## 1.1 Общая характеристика предприятия

Надежное и бесперебойное электроснабжение является критически важным фактором для эффективного функционирования современного тепличного хозяйства. Разнообразие технологических процессов, применяемых в тепличном производстве, обуславливает использование широкого спектра электрических приемников, каждый из которых выполняет специфическую функцию и характеризуется определенными параметрами энергопотребления. Правильная классификация и детальный анализ электрических приемников являются необходимой предпосылкой для корректного расчета электрических нагрузок и последующего проектирования эффективной системы электроснабжения. Основные исходные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Исходные данные

$U_H$ , кВ	$S_{K3}$ , МВА	$L$ , км	Схема	Норм. $\tan\varphi$	$V_{цпmin}$	$V_{цпmax}$
10	250	1,2	Радиальная	0,25	+2%	0%

В таблице 1 приняты следующие обозначения:

$U_H$  – номинальное напряжение;

$S_{K3}$  – мощность короткого замыкания от энергосистемы;

$L$  – длина питающей линии;

$\tan\varphi$  – коэффициент реактивной мощности;

$V_{цпmin}$ ,  $V_{цпmax}$  – минимальное и максимальное отклонение напряжения.

В данном тепличном хозяйстве предусмотрено использование нижеперечисленных типов электрических приемников.

Характеристики вышеприведенных электроприемников приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Перечень электрических приемников

Наимен. ЭП	Кол.	Мощн. кВт	$\cos\varphi$	$tg\varphi$	$U_n, В$	$K_u$
Основные насосные агрегаты	9	17	0,50	1,73	380	0,15
Дистиллятор	8	10	0,50	1,73	380	0,13
Компрессор	4	21	0,65	1,17	380	0,18
Сульфуратор	6	11	0,65	1,17	380	0,11
Мотор-редуктор зашторивания	6	18	0,50	1,73	380	0,12
Мотор-редуктор вентиляции	9	15	0,65	1,17	380	0,12
Насос подачи воды	1	5	0,70	2,68	380	0,33
Вентилятор	7	5	0,80	0,75	380	0,85
Сварочная машина дуговой сварки	2	17	0,70	1,02	380	0,3
Сварочный выпрямитель	8	13	0,65	1,17	380	0,3
Насос для перекачки удобрений	5	14	0,65	1,17	380	0,22
Дренажный насос	5	58	0,95	0,33	380	0,82
Тепловая завеса (вентилятор)	1	4	0,80	0,75	380	0,82
Кран-балка	2	4	0,52	1,732	380	0,2

Продолжая описание характеристик помещения, отметим, что высота теплицы 8 метров выбрана исходя из агротехнических требований выращиваемых культур, обеспечивая достаточный объем воздуха для растений и удобство проведения работ. Железобетонные конструкции обеспечивают необходимую прочность и долговечность сооружения. Колонны сечением 0.5 × 0.5 метра, расположенные с шагом 6 метров, создают оптимальное соотношение между несущей способностью и полезной площадью. Наличие вспомогательных помещений, помимо основного производственного пространства, предусмотрено для размещения систем управления микроклиматом, хранения удобрений, инвентаря и других вспомогательных операций. Общая площадь помещения 7200 м<sup>2</sup> (60м x 120м) рассчитана исходя из планируемых объемов производства и технологической схемы размещения оборудования.

Таблица 2 предоставляет информацию о количестве, мощности, коэффициенте мощности  $\cos\varphi$ , тангенсе угла сдвига фаз  $tg\varphi$ , номинальном

напряжении и коэффициенте использования  $K_u$  для каждого типа электроприемника. Рассмотрим более подробно некоторые из них.

9 насосов общей мощностью 153 кВт составляют значительную часть нагрузки. Низкий  $\cos\varphi$  0.5, характерный для асинхронных двигателей, указывает на существенное потребление реактивной мощности, что необходимо компенсировать для снижения нагрузки на сеть и потерь электроэнергии. Коэффициент использования 0.15 свидетельствует о неравномерности графика нагрузки в течение суток, что связано с цикличностью процессов орошения. Применение частотно-регулируемых приводов (ЧРП) позволяет значительно оптимизировать режимы работы насосов, снижая энергопотребление и продлевая срок службы оборудования. ЧРП позволяют плавно регулировать частоту вращения двигателя насоса, подстраивая его производительность под текущие потребности системы орошения. Выбор конкретной модели насоса должен основываться на анализе гидравлических характеристик системы, требуемом напоре, расходе воды и характеристиках системы гидропоники. Рекомендуется использовать насосы высокого класса энергоэффективности.

8 дистилляторов общей мощностью 80 кВт также вносят заметный вклад в общую нагрузку. Низкий  $\cos\varphi$  0,5 обусловлен использованием нагревательных элементов, которые представляют собой активно-индуктивную нагрузку. Для компенсации реактивной мощности дистилляторов, как и в случае с насосными агрегатами, необходимо предусмотреть установку компенсирующих устройств. Коэффициент использования 0.13 указывает на то, что дистилляторы в среднем работают не на полную мощность. Это может быть связано с наличием накопительных емкостей для дистиллированной воды, что позволяет дистилляторам работать с перерывами.

6 сульфураторов общей мощностью 66 кВт используются для борьбы с грибковыми заболеваниями растений.  $\cos\varphi = 0.65$ , близкий к компрессорам, указывает на преимущественно активную составляющую потребляемой

мощности. Коэффициент использования 0.11 говорит о периодическом использовании сульфураторов, что связано с профилактическим характером обработки растений. Выбор модели сульфуратора зависит от размера тепличного хозяйства и видов выращиваемых культур. Важно учитывать требования безопасности при работе с серой и обеспечить эффективную вентиляцию помещения во время обработки.

6 мотор-редукторов общей мощностью 1-8 кВт управляют системой зашторивания, регулируя поступление солнечного света и тем самым влияя на температурный режим в теплице. Низкий  $\cos\varphi$  0.50 и коэффициент использования 0.12 свидетельствуют о циклической работе системы зашторивания и необходимости компенсации реактивной мощности. Современные системы зашторивания могут быть автоматизированы и интегрированы с системой управления микроклиматом теплицы. Выбор мотор-редукторов зависит от площади зашторивания, веса материала и требований к скорости перемещения экранов.

9 мотор-редукторов общей мощностью 135 кВт обеспечивают работу системы вентиляции.  $\cos\varphi$  0.65 указывает на относительно невысокое потребление реактивной мощности. Коэффициент использования 0.12 говорит о том, что вентиляционная система работает не на полную мощность в течение всего времени. Выбор мотор-редукторов и вентиляторов зависит от требуемого воздухообмена в теплице, который в свою очередь определен ее объемом, видами выращиваемых культур и климатическими условиями.

Один насос мощностью 5 кВт обеспечивает подачу воды для орошения и других нужд тепличного хозяйства.  $\cos\varphi = 0.70$  и коэффициент использования 0.33. Необходимо учитывать характеристики источника водоснабжения (скважина, водопровод) при выборе насоса.

7 вентиляторов общей мощностью 35 кВт используются для циркуляции воздуха внутри теплицы. Высокий  $\cos\varphi$  0.80 и коэффициент использования 0.85 свидетельствуют об эффективной работе вентиляторов.

2 сварочные машины и 8 сварочных выпрямителей общей мощностью 138 кВт предназначены для проведения ремонтных и сварочных работ. Эти приемники характеризуются неравномерным графиком нагрузки и низким  $\cos\varphi$ .

5 насосов общей мощностью 70 кВт используются для подачи удобрений.

5 насосов общей мощностью 290 кВт служат для откачки дренажной воды. Высокий  $\cos\varphi$  0.95 и коэффициент использования 0.82 говорят об эффективной работе насосов.

Одна тепловая завеса мощностью 4 кВт устанавливается над входом в теплицу. 2 кран-балки общей мощностью 8 кВт используются для перемещения грузов.

«Для данного тепличного хозяйства принята вторая категория надежности электроснабжения в соответствии с требованиями ПУЭ [21]. Это означает, что допускается перерыв электроснабжения на время, необходимое для включения резервного питания, но не более 24 часов» [21]. Выбор второй категории обусловлен тем, что кратковременный перерыв электроснабжения не приведет к значительным экономическим потерям и не создаст угрозы безопасности персонала. Для обеспечения второй категории надежности предусмотрено резервирование питания от двух независимых источников.

Среда внутри теплицы классифицируется как нормальная в соответствии с ПУЭ [21]. Температура, влажность и другие параметры микроклимата контролируются и поддерживаются в пределах, допустимых для нормальной работы электрооборудования. Однако, следует учитывать повышенную влажность в теплице при выборе электрооборудования и материалов для прокладки электропроводки.

Тепличное хозяйство работает в двухсменном режиме с годовым временем работы электроприемников  $T_m = 4000$  часов. Это необходимо учитывать при расчете электрических нагрузок и выборе мощности трансформаторной подстанции.

## 1.2 Анализ требований к электроснабжению объекта

Надежность электроснабжения является одним из ключевых факторов, определяющих эффективность и экономическую целесообразность функционирования тепличного хозяйства. Бесперебойная подача электроэнергии необходима для поддержания заданных параметров микроклимата, работы систем орошения, освещения, вентиляции и других технологических процессов. Перебои в электроснабжении могут привести к нарушению температурного режима, гибели растений, снижению урожайности и, как следствие, значительным экономическим потерям. Поэтому к системе электроснабжения тепличных хозяйств предъявляются повышенные требования по надежности.

Для обеспечения высокой надежности электроснабжения применяется комплекс технических решений, включая:

- резервирование источников питания;
- автоматическое включение резерва (АВР);
- использование надежного электрооборудования;
- регулярное техническое обслуживание.

Резервирование источников питания подразумевает подключение тепличного хозяйства к двум независимым источникам питания позволяет обеспечить бесперебойную подачу электроэнергии в случае аварийного отключения одного из них. В качестве резервного источника может использоваться дизель-генераторная установка (ДГУ).

Система АВР обеспечивает автоматическое переключение на резервный источник питания в случае отключения основного. Время переключения должно быть минимальным, чтобы исключить нарушение технологических процессов.

Регулярное техническое обслуживание подразумевает планово-предупредительные ремонты и профилактические испытания

электрооборудования позволяют своевременно выявлять и устранять потенциальные неисправности, предотвращая аварийные ситуации.

Качество электроэнергии также оказывает значительное влияние на работу тепличного хозяйства. Основные параметры качества электроэнергии, которые необходимо контролировать:

- отклонение напряжения;
- частота сети;
- коэффициент искажения синусоидальности напряжения;
- фликер.

Допустимые отклонения напряжения составляют  $\pm 5\%$  от номинального значения. Значительные отклонения напряжения могут привести к неправильной работе электрооборудования, снижению его срока службы и даже к его выходу из строя.

Для обеспечения требуемого качества электроэнергии применяются различные технические средства, такие как стабилизаторы напряжения, фильтры гармоник, устройства компенсации реактивной мощности и др. Выбор конкретных средств зависит от характеристик электросети и требований к качеству электроэнергии. Это позволит обеспечить надежное и эффективное функционирование тепличного хозяйства и минимизировать риск возникновения аварийных ситуаций, связанных с некачественным электроснабжением. Особое внимание уделено компенсации реактивной мощности. Это позволит не только обеспечить бесперебойную работу электрооборудования, но и снизить эксплуатационные затраты за счет повышения энергоэффективности.

Выбор величины напряжения для системы электроснабжения тепличного хозяйства является важным этапом проектирования, влияющим на безопасность, эффективность и экономичность ее эксплуатации. Необходимо учитывать мощность потребителей, длину линий электропередачи, стоимость электрооборудования и другие факторы.

В данном проекте принято решение использовать стандартную для РФ систему электроснабжения с трехфазным напряжением 380/220 В с глухозаземленной нейтралью (система TN-C-S). Этот выбор обусловлен следующими преимуществами:

- большинство электроприемников, используемых в тепличных хозяйствах, рассчитаны на напряжение 380/220 в.
- система 380/220 В позволяет питать как трехфазные силовые приемники (насосы, компрессоры, вентиляторы), так и однофазные осветительные приемники и бытовые приборы.
- глухозаземленная нейтраль обеспечивает безопасность персонала при возникновении однофазных замыканий на землю.
- при выбранном напряжении обеспечивается разумный компромисс между стоимостью кабельных линий и потерями электроэнергии в них.

Таким образом, выбранная система электроснабжения с напряжением 380/220 В и объединенным питанием от понижающего трансформатора является оптимальным решением для данного тепличного хозяйства, обеспечивая надежное, безопасное и экономичное электроснабжение всех потребителей.

### **1.3 Анализ возможностей электроснабжения с учетом местных условий**

Проектирование системы электроснабжения тепличного хозяйства требует не только учета внутренних потребностей объекта, но и тщательного анализа внешних факторов, определяющих доступность и надежность электроснабжения в данном конкретном регионе. Этот анализ, в первую очередь, включает в себя оценку состояния существующей электрической инфраструктуры, а именно, наличие и удаленность ближайших подстанций, пропускную способность линий электропередачи (ЛЭП), а также техническое

состояние распределительных сетей. Детальное изучение этих параметров позволяет определить наиболее оптимальные точки подключения тепличного комплекса к энергосистеме, минимизируя затраты на строительство новых линий и обеспечивая необходимую мощность. Важно оценить не только текущее состояние, но и перспективные планы развития энергосистемы региона, чтобы предусмотреть возможность увеличения потребляемой мощности в будущем, при расширении тепличного хозяйства.

Следующим важным аспектом является анализ тарифной политики региональных энергоснабжающих организаций. Различные тарифы на электроэнергию для разных категорий потребителей, а также наличие специальных программ стимулирования энергоэффективности могут существенно повлиять на эксплуатационные расходы тепличного комплекса. Детальное изучение тарифных сеток, условий договоров электроснабжения и возможных льгот позволяет выбрать наиболее экономически выгодный вариант подключения и оптимизировать затраты на электроэнергию. Кроме того, необходимо учитывать возможность применения дифференцированных тарифов, например, по времени суток, что может дать дополнительные возможности для экономии при грамотном планировании работы энергоемкого оборудования.

Особое внимание при анализе возможностей электроснабжения уделяется оценке надежности и качества электроэнергии в данной местности. Необходимо изучить статистику аварийных отключений, колебаний напряжения и частоты в сети за последние несколько лет. Эти данные, как правило, доступны в региональных энергетических компаниях или у операторов систем распределения электроэнергии. Полученная информация позволяет оценить риски, связанные с перебоями в электроснабжении, и предусмотреть соответствующие меры по их минимизации. Например, «установка источников бесперебойного питания (ИБП) для критически важного оборудования, такого как системы управления микроклиматом, или

использование дизель-генераторных установок (ДГУ) в качестве резервного источника питания» [21].

Помимо технических и экономических факторов, необходимо учитывать и экологические аспекты. В частности, следует рассмотреть возможность использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ), таких как солнечные панели или ветрогенераторы, для частичного или полного обеспечения тепличного хозяйства электроэнергией. Это не только способствует снижению негативного воздействия на окружающую среду, но и может повысить энергетическую независимость предприятия, а в некоторых регионах – дать дополнительные экономические преимущества за счет "зеленых" тарифов или субсидий. Применение ВИЭ также может рассматриваться как элемент повышения имиджа компании и ее социальной ответственности.

Таким образом, комплексный анализ возможностей электроснабжения с учетом местных условий, охватывающий технические, экономические, экологические и нормативно-правовые аспекты, является неотъемлемой частью разработки эффективной и надежной системы электроснабжения тепличного хозяйства. Такой подход позволяет принять обоснованные проектные решения, минимизировать риски и обеспечить устойчивое функционирование предприятия в долгосрочной перспективе. Грамотный учет всех факторов, специфичных для данного региона, обеспечивает оптимальное соотношение между капитальными затратами на строительство системы электроснабжения, эксплуатационными расходами и уровнем надежности электроснабжения.

#### **1.4 Формулировка целей, задач и направлений исследований**

Главной целью данного проекта является разработка комплексной, надежной, экономически обоснованной и энергоэффективной системы электроснабжения для тепличного хозяйства, описанного в предыдущих

разделах. Система должна полностью удовлетворять потребности предприятия в электроэнергии, обеспечивая бесперебойное функционирование всех технологических процессов, связанных с выращиванием сельскохозяйственных культур, и при этом соответствовать всем действующим нормам и правилам в области электроэнергетики и безопасности.

Для обеспечения надежности электроснабжения необходимо разработать систему резервирования, включая выбор и расчет мощности резервных источников питания, а также схемы автоматического включения резерва (АВР).

В рамках данного проекта также необходимо провести исследование по выбору оптимального электрооборудования. Это включает в себя выбор коммутационных аппаратов, защитных устройств, устройств релейной защиты и автоматики, а также измерительных приборов. При выборе оборудования необходимо учитывать не только его технические характеристики, но и надежность, стоимость, а также соответствие требованиям нормативных документов. Важным направлением исследований является разработка мероприятий по обеспечению электробезопасности персонала, включая заземление, зануление, защитное отключение и другие меры, предусмотренные правилами устройства электроустановок (ПУЭ).

Конечным результатом исследований должно стать создание полного комплекта проектной документации, включающей в себя принципиальные схемы электроснабжения, планы расположения электрооборудования, спецификации оборудования и материалов, а также расчеты, обосновывающие принятые решения. Разработанная система электроснабжения должна быть не только технически совершенной, но и экономически эффективной, обеспечивая минимальные затраты на строительство и эксплуатацию при соблюдении всех требований надежности и безопасности. Только комплексный подход, учитывающий все перечисленные задачи и направления

исследований, позволит создать оптимальную систему электроснабжения для данного тепличного хозяйства.

Выводы по 1 разделу:

Целью работы является проектирование гибридной системы электроснабжения, обеспечивающей надежную работу тепличного хозяйства. Для достижения данной цели нужно обосновать выбор схемы электроснабжения, рассчитать электрические нагрузки, выбрать кабельную продукцию и коммутационную аппаратуру. Система электроснабжения с напряжением 380/220 В и питанием от понижающего трансформатора является оптимальным решением для данного тепличного хозяйства, обеспечивая надежное, безопасное и экономичное электроснабжение всех потребителей. На объекте возможно использование ветросолнечной электростанции.

## 2 Разработка системы электроснабжения

### 2.1 Расчет электрических нагрузок

«Надежное и бесперебойное электроснабжение является критически важным фактором для эффективного функционирования современного тепличного хозяйства. Основные исходные данные приведены в таблице 1.

Расчет нагрузок выполнен в соответствии с методикой, изложенной в» [1], [4]. Основными этапами расчета являются:

Определение суммарной мощности электроприемников  $P_{\Sigma}$ . Для каждой группы электроприемников с одинаковыми коэффициентами использования  $K_{и}$  и тангенсом угла сдвига фаз  $tg\varphi$  определена суммарная мощность путем умножения мощности одного электроприемника на их количество.

Расчет среднесменной мощности  $P_{см}$  и  $Q_{см}$ . Среднесменная активная мощность рассчитывается путем умножения суммарной мощности на коэффициент использования. Среднесменная реактивная мощность рассчитывается путем умножения среднесменной активной мощности на  $tg\varphi$ .

$$P_{см} = K_{и} P_{\Sigma}, \quad (1)$$

$$Q_{см} = P_{см} tg\varphi \quad (2)$$

«Определение эффективного числа электроприемников  $n_{э}$ : Этот параметр учитывает неравномерность нагрузки отдельных электроприемников и используется для более точного расчета коэффициента расчетной нагрузки.

$$n_{э} = \frac{(\sum P_{\Sigma})^2}{\sum (nP_1^2)} \quad (3)$$

где  $\sum P_{\Sigma}$  – Мощность всех электрических потребителей;

$n$  – Число электрических потребителей;

$P_l$  – Мощность электрических потребителей.

Расчет среднего коэффициента использования  $K_{u\text{ ср}}$  [14]. Этот коэффициент представляет собой отношение суммы среднесменных мощностей всех групп к сумме их суммарных мощностей.

$$K_{u\text{ ср}} = \frac{\sum P_{см}}{\sum P_{\Sigma}} \quad (4)$$

Определение коэффициента расчетной нагрузки  $K_p$  учитывает неодновременность включения электроприемников и зависит от числа электроприемников и их среднего коэффициента использования. Значение  $K_p$  определено по таблицам или графикам, приведенным в [16].

«Расчет расчетной активной и реактивной мощности  $P_p$  и  $Q_p$ : Расчетная активная мощность определена путем умножения суммы среднесменных мощностей на  $K_p$ . Расчетная реактивная мощность рассчитывается аналогично.

$$P_p = K_p \sum P_{см} \quad (5)$$

Реактивная мощность:

$$Q_p = K_p \sum Q_{см} \quad (6)$$

При расчете реактивной нагрузки для электрических сетей до 1 киловольта, необходимо учитывать количество приемников пэ.

$$\text{При } n_{\Sigma} \leq 10 \quad Q_p = 1,1 \sum Q_{см}$$

$$\text{При } n_{\Sigma} > 10 \quad Q_p = \sum Q_{см} \text{» [17]}$$

«Учет мощности освещения: При расчете нагрузки на трансформаторную подстанцию необходимо учитывать также мощность осветительных приемников. Она может быть определена методом удельной мощности на единицу площади.

$$P_{p.o} = K_{u.o} P_{y\delta.o} F_{\text{ц}} \quad (7)$$

$$Q_{p.o} = K_{u.o} P_{y\delta.o} F_{\text{ц}} \operatorname{tg} \varphi = P_{p.o} \operatorname{tg} \varphi, \quad (8)$$

где  $K_{u.o} = 0,950$  – коэффициент использования;

$P_{y\delta.o}$  – удельная мощность, кВт/м<sup>2</sup>.

Расчет полной расчетной мощности  $S_p$  и расчетного тока  $I_p$ : Полная расчетная мощность рассчитывается по формуле:

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

Рассмотрим пример основных насосных агрегатов для расчета групповой нагрузки исходного цеха с использованием описанной методики.

Для расчета нагрузок необходимо внести в таблицу все электроприемники, их количество,  $K_u$ ,  $\operatorname{tg} \varphi$ , относящиеся к одному узлу питания. При этом возможно объединение электроприемников с одинаковыми коэффициентами использования и  $\operatorname{tg} \varphi$  в одну группу. Также важно учесть мощность осветительной нагрузки цеха.

Суммарная мощность групп электроприемников  $P_{\Sigma}$ .

$$P_{\Sigma} = n \cdot p_n = 9 \cdot 17 = 153 \text{ кВт}$$

Рассчитываются средние (среднесменные) активные и реактивные мощности всех групп электроприемников:

$$P_{cm} = K_u P_{\Sigma} = 0,15 \cdot 153 = 22,95 \text{ кВт},$$

$$Q_{cm} = P_{cm} \operatorname{tg} \varphi = 22,95 \cdot 1,73 = 39,75 \text{ кВАр}.$$

Производится расчета числа электроприемников по формуле:

$$n_p = \frac{(\sum P_{\Sigma})^2}{\sum (nP_1^2)} = 47,2.$$

$n_p$  принимаем равным 47 шт.

Рассчитывается средний коэффициент использования  $K_{u \text{ ср}}$  [18]

$$K_{u \text{ ср}} = \frac{\sum P_{cm}}{\sum P_{\Sigma}} = 0,36$$

«Для определения коэффициента расчетной нагрузки  $K_p$  на шинах НН цеховых трансформаторов и магистральных шинопроводов с напряжением до 1 кВ необходимо учитывать количество электроприемников и их средний коэффициент использования. Для питающих сетей, таких как распределительные шинопроводы, шкафы и пункты, этот коэффициент определен с использованием таблицы 1» [18].

«Расчетная активная мощность равна:

$$P_p = K_p \sum P_{cm} = 1,165 \cdot 426 = 495,84 \text{ кВт}$$

Расчетная реактивная мощность.

При расчете нагрузок на шины цеховых трансформаторных подстанций и магистральных шинопроводов необходимо учитывать общую нагрузку по предприятию, цеху и корпусу.

$$Q_p = K_p \sum Q_{cm} = 1,165 \cdot 305 = 355,29 \text{ кВАр}$$

При расчете нагрузки на шинах НН цеховых трансформаторов учитывается расчетная мощность освещения цеха, добавляемая к расчетной мощности силовых электроприемников. В случае отсутствия данных о нагрузке осветительных установок, ее можно примерно определить методом удельной мощности на единицу площади.

$$P_{p.o} = K_{u.o} P_{уд.o} F_{ц} = 0,9 \cdot 0,02 \cdot 7,2 = 129,6 \text{ кВт},$$

$$Q_{p.o} = K_{u.o} P_{уд.o} F_{ц} \operatorname{tg} \varphi = P_{p.o} \operatorname{tg} \varphi = 129,6 \cdot 0,62 = 80,32 \text{ кВАр}$$

где  $K_{u.o}$  – коэффициент использования осветительных установок, принимается 0,9;

$P_{уд.o}$  – удельная мощность освещения, кВт/м<sup>2</sup>, для освещения выполненного лампами ДРЛ – 20 Вт/м<sup>2</sup>;  $F_{ц}$  – площадь цеха, м<sup>2</sup>, определен по плану;

$\operatorname{tg} \varphi$  – коэффициент реактивной мощности, для ламп ДРЛ 0,62.

Полная расчетная мощность:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \sqrt{625,44^2 + 436,61^2} = 762,19 \text{ кВА}$$

Расчетный ток:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} U_n} = \frac{762,19}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 1158,02 \text{ А}$$

Результаты расчета нагрузок представлены в Таблице 3. Полученные значения расчетной мощности [19]  $P_p = 625,44 \text{ кВт}$ ,  $Q_p = 435,61 \text{ кВАр}$ ,  $S_p = 762,19 \text{ кВА}$  и расчетного тока  $I_p = 1158,02 \text{ А}$  будут использованы для выбора мощности трансформаторной подстанции и сечения кабельных линий.

Таблица 3 - Расчет нагрузок

Исходные данные				Расчетные величины							Kp	Расчетная мощность			Расчетный ток, А
По заданию			Справочные данные			Ku·Pn	Ku·Pn·tgφ	n·Pn^2	nэ=(∑Pn)^2/∑n·Pn^2	Активная, кВт		Реактивная,кВАр	Полная, кВА		
Наименование ЭП	n	Мощность, кВт		Ku	cosφ						tgφ				
		Pn макс	∑Pn=n·Pn												
Основные насосные агрегаты	9	17	153	0,15	0,5	1,73	22,95	39,75	2601	-	-	-	-	-	
Дистиллятор	8	10	80	0,13	0,5	1,73	10,40	18,01	800	-	-	-	-	-	
Компрессор	4	21	84	0,18	0,65	1,17	15,12	17,68	1764	-	-	-	-	-	
Сульфуратор	6	11	66	0,11	0,65	1,17	7,26	8,49	726	-	-	-	-	-	
Мотор-редуктор зашторивания	6	18	108	0,12	0,5	1,73	12,96	22,45	1944	-	-	-	-	-	
Мотор-редуктор вентиляции	9	15	135	0,12	0,65	1,17	16,20	18,94	2025	-	-	-	-	-	
Насос подачи воды	1	5	5	0,33	0,7	1,02	1,65	1,68	25	-	-	-	-	-	
Вентилятор	7	5	35	0,85	0,8	0,75	29,75	22,31	175	-	-	-	-	-	
Сварочная машина дуговой сварки	2	17	34	0,3	0,7	1,02	10,20	10,41	578	-	-	-	-	-	
Сварочный выпрямитель	8	13	104	0,3	0,65	1,17	31,20	36,48	1352	-	-	-	-	-	
Насос для перекачки удобрений	5	14	70	0,22	0,65	1,17	15,40	18,00	980	-	-	-	-	-	
Дренажный насос	5	58	290	0,82	0,95	0,33	237,80	78,16	16820	-	-	-	-	-	

Продолжение таблицы 3

Исходные данные				Расчетные величины				Kp	Расчетная мощность			Расчетный ток, А			
По заданию			Справочные данные			Ku·Pn	Ku·Pn·tgφ		n·Pn^2	nэ = (∑Pn)^2 / ∑n·Pn^2	Активная		Реактивная	Полная	
Наименование ЭП	n	Мощность, кВт		Ki	cosφ						tgφ		я, кВт	ая,кВАр	, кВА
		Rn макс	∑Pn=n·Pn			Pp = Kp·Ku·Pn	Qp = 1,1·Ku·Pn·tgφ при nэ ≤ 10 Qp = Ku·Pn·tgφ при nэ > 10	Sp = √(Pp^2 + Qp^2)							
Тепловая завеса (вентилятор)	4	4	16	0,82	0,8	0,75	13,12	9,84	64	4	-	-	-	-	
Кран-балка	2	4	8	0,2	0,5	1,73	1,60	2,77	32	2	-	-	-	-	
Итого	76	212	1188	0,36	0,813	0,717	426	305	29886	47,00	1,165	495,84	355,29	609,99	926,78
Электрическое освещение	7200	0,02	0,02	0,9	0,85	0,620	129,6	80,319	—			129,6	80,31886626	152,47	231,66
Всего по цеху							555,21	385,29				625,44	435,61	762,19	1158,02

Важно отметить, что при расчете нагрузок были учтены специфические особенности тепличного хозяйства, такие как неравномерность нагрузки в течение суток, сезонные колебания энергопотребления, а также высокое потребление реактивной мощности некоторыми электроприемниками. Это позволяет обеспечить надежное и экономичное электроснабжение тепличного хозяйства в любых режимах работы. Кроме того, для повышения точности расчета были использованы актуальные нормативные документы и справочные материалы. Полученные результаты свидетельствуют о том, что для обеспечения электроснабжения тепличного хозяйства необходима трансформаторная подстанция достаточно большой мощности.

## 2.2 Разработка схемы электроснабжения

Выбор схемы цеховой сети электроснабжения играет важную роль в обеспечении надежного, безопасного и экономичного электроснабжения всех потребителей тепличного хозяйства. При выборе схемы учитываются такие факторы как размещение электропримеников, требования к надежности электроснабжения, возможность расширения и другие факторы.

$$X = \frac{\sum(P_{уст. i} X_i)}{\sum P_{уст. i}} \quad Y = \frac{\sum(P_{уст. i} Y_i)}{\sum P_{уст. i}} \quad (10)$$

где  $X_i, Y_i$  – координаты  $i$ -го электрического приемника

$P_{уст. i}$  – установленная мощность  $i$ -го электрического приемника.

Координаты станков и их установленную мощность запишем:» [25]

$$N = 76, \sum P_{уст} = 1192, \sum X P_{уст} = 93452,6; \sum Y P_{уст} = 35152,3.$$

Центр электрических нагрузок изображен на рисунке 1.

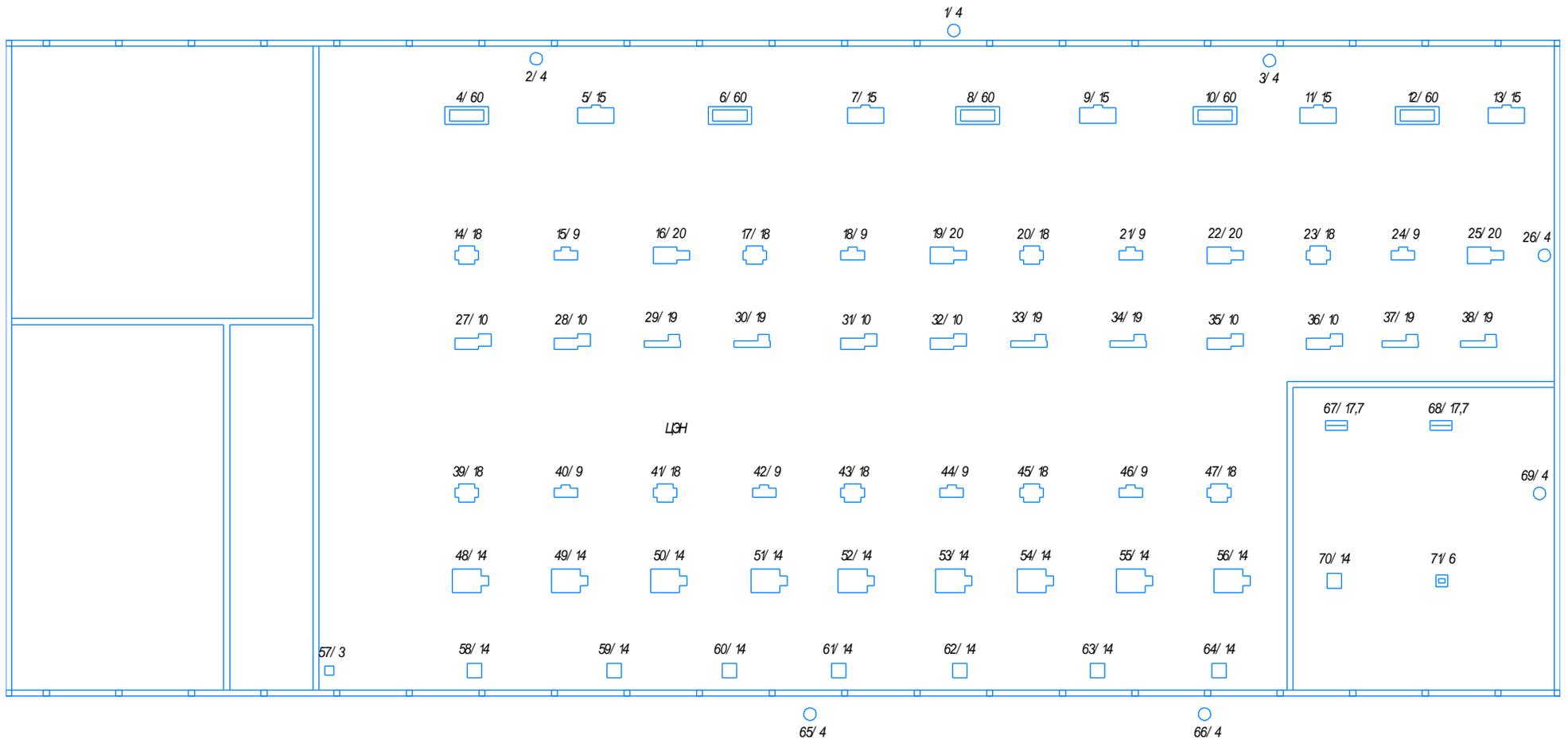
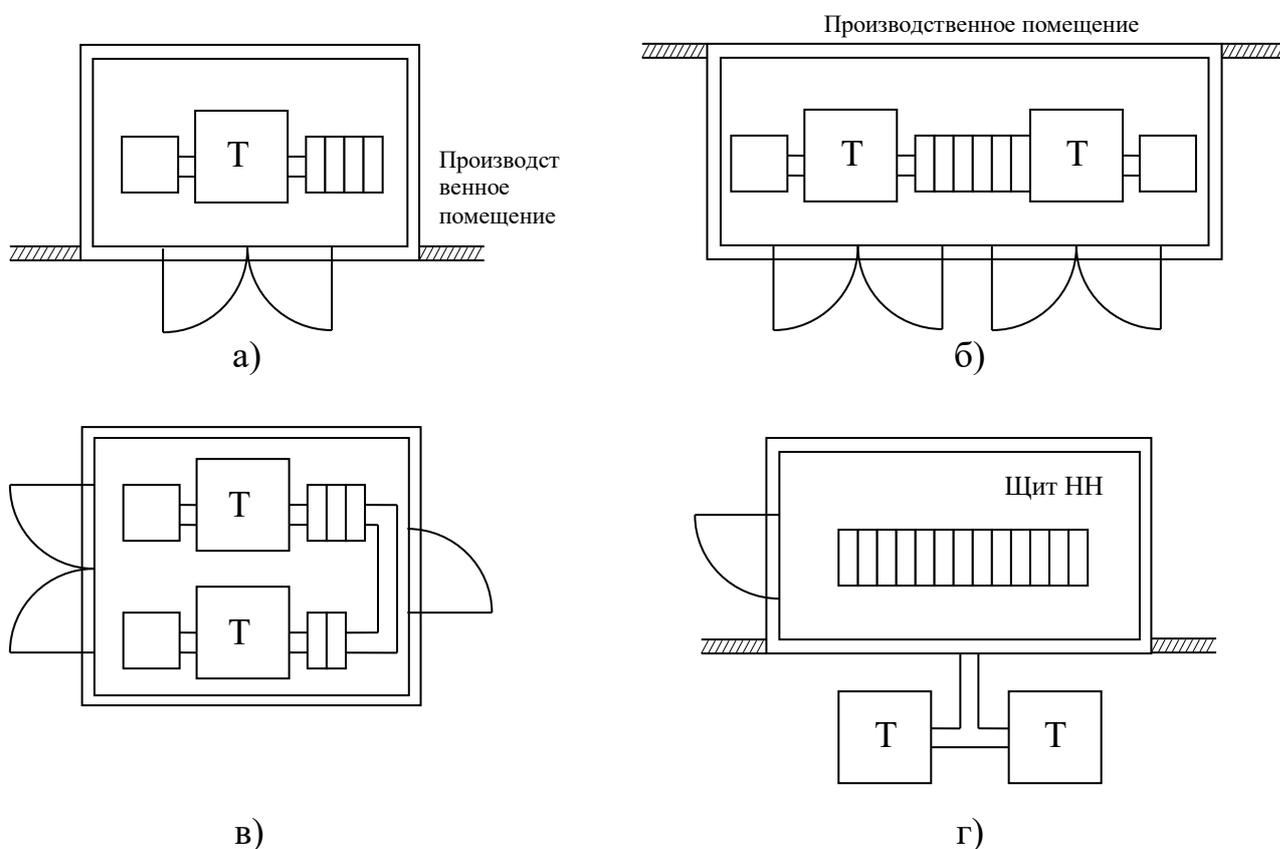


Рисунок 1 - Расположение ЦЭН

Для оптимального размещения трансформаторной подстанции (ТП) необходимо определить центр электрических нагрузок (ЦЭН). ЦЭН рассчитывается по формулам (10):

$$X = \frac{93452,6}{1192} = 79,6 \quad Y = \frac{35152,3}{1192} = 29,9$$

Варианты размещения цеховых ТП приведены на рисунке 2.



«а – однотрансформаторная встроенная КТП; б – двухтрансформаторная пристроенная КТП однорядного исполнения; в – двухтрансформаторная отдельно стоящая КТП двухрядного исполнения; г – КТП с наружной установкой трансформаторов.» [20]

Рисунок 2 - Варианты размещения цеховых ТП

Место размещения ТП выбирается с учетом расположения ЦЭН, технологического оборудования, коммуникаций и других факторов. В

идеальном случае ТП должна быть расположена как можно ближе к ЦЭН, чтобы минимизировать длину кабельных линий и потери напряжения в них.

В данном проекте рассматриваются следующие варианты размещения ТП:

Встроенная КТП, изображенная на рисунке 2 а: Трансформатор размещается непосредственно в производственном помещении. Этот вариант позволяет минимизировать длину кабельных линий, но требует соблюдения повышенных мер безопасности.

Пристроенная КТП, изображенная на рисунке 2 б: ТП пристраивается к зданию цеха. Этот вариант является компромиссным между встроенной и отдельно стоящей ТП.

Отдельно стоящая КТП, изображенная на рисунке 2 в, г: ТП размещается в отдельном здании. Этот вариант обеспечивает наибольшую безопасность, но требует прокладки более длинных кабельных линий.

В данном проекте выбран вариант Пристроенная КТП. Место размещения ТП выбрано с учетом близости к ЦЭН, требованиям пожарной безопасности.

Преимущества выбранной схемы:

- простота и наглядность;
- высокая надежность;
- возможность поэтапного расширения.

Схема цеховой сети представлена на рисунке 3. На схеме показаны трансформатор, магистральный шинопровод, распределительные шинопроводы, электроприемники.

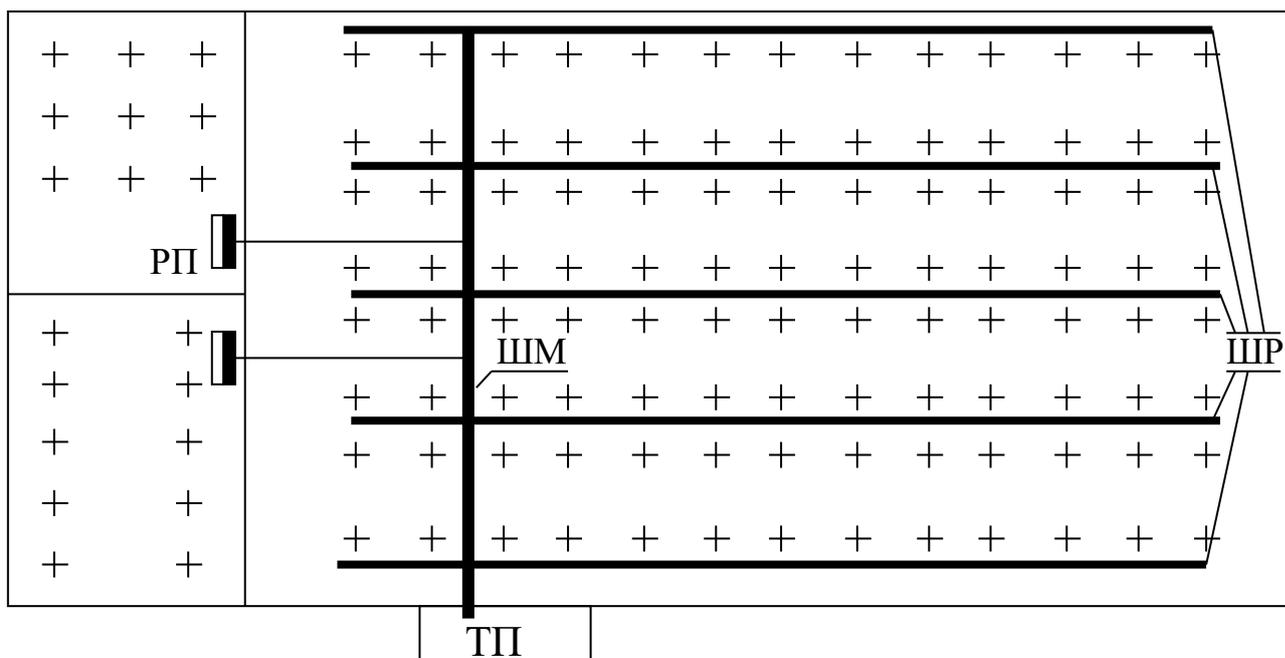


Рисунок 3 - Схема цеховой сети

Для данного тепличного хозяйства выбрана радиальная схема электроснабжения по принципу "блок трансформатор - магистраль". Эта схема характеризуется относительной простотой, надежностью и экономичностью. Она предусматривает питание электроприемников от магистрального шинного провода (ШМА), проложенного вдоль цеха, с последующим разветвлением на распределительные шинные провода (ШРА) для отдельных групп потребителей.

### 2.3 Выбор трансформаторов, кабелей и коммутационного оборудования

Данное предприятие тепличного хозяйства отнесено ко второй категории надежности.

В рамках расчета рассмотрим сценарии с одним и двумя трансформаторами, и проведем расчет реактивной мощности каждого трансформатора.

$$Q_3 = P_p \operatorname{tg} \varphi_H = 625,44 \cdot 0,25 = 156,4 \text{ кВАр} \quad (11)$$

Мощность компенсирующих устройств:

$$Q_{ку} = Q_p - Q_3 = 435,61 - 156,4 = 279,25 \text{ кВАр} \quad (12)$$

Рассматриваются два основных варианта схемы электроснабжения:

Однотрансформаторная подстанция: более простая и экономичная схема, но менее надежная.

Двухтрансформаторная подстанция: более надежная схема, обеспечивающая резервирование питания, но более дорогая.

Рассматривается вариант с использованием одного трансформатора.

$$S_{mp} = \frac{P_p}{1 \cdot K_3} = \frac{625,44}{1 \cdot 0,65} = 962,2 \text{ кВА}, \quad (13)$$

где  $K_3$  – коэффициент загрузки,

«Для двух трансформаторных подстанций рекомендуется принимать коэффициент  $K_3$  в диапазоне от 0,6 до 0,8, а для одной трансформаторной подстанции - от 0,7 до 0,9.  $N_t$  обозначает количество трансформаторов.

При использовании трансформатора мощностью 1000 кВА, его максимальная пропускная способность:

$$Q_{mp.max} = \sqrt{(S_{н.мп} N_m K_3)^2 - P_p^2} = \sqrt{(1000 \cdot 1 \cdot 0,65)^2 - 625,44^2} = 177 \text{ квар} \quad (14)$$

Так как  $Q_{mp.max}$  больше  $Q_3$ ,  $156,4 < 177$ , то компенсирующее устройство более целесообразно расположить на стороне низкого напряжения.» [1]

$$Q_{mp.max} \leq Q_{\Delta}, \quad (15)$$

$$Q_{вкy} = 0, \quad (16)$$

$$Q_{нкy} = Q_p - Q_{mp.max}; Q_m = Q_{mp.max} \quad (17)$$

$$Q_{\Delta} \leq Q_{mp.max} \leq Q_p, \quad (18)$$

$$Q_{вкy} = Q_{mp} - Q_{\Delta}, \quad (19)$$

$$Q_{нкy} = Q_{кy} - Q_{вкy}; Q_m = Q_{mp.max} \quad (20)$$

Поэтому:

$$Q_{вкy} = 0,$$

$$Q_{нкy} = Q_p - Q_{mp.max} = 435,61 - 177 = 258,61 \text{ кВАр},$$

$$Q_m = 177 \text{ кВАр}.$$

Компенсирующие устройства могут быть установлены как на стороне высокого напряжения (ВН), так и на стороне низкого напряжения (НН). Выбор места установки определен технико-экономическим расчетом.

Рассматривается вариант с использованием двух трансформаторов.

$$S_{тр} = \frac{P_p}{1 * K_3} = \frac{625,44}{2 \cdot 0,7} = 446,7 \text{ кВА}$$

Рассмотрим вариант с двумя трансформаторами с мощностью по 630 кВА каждый.

Максимальная пропускная способность трансформаторов:

$$Q_{mp.max} = \sqrt{(S_{н.тр} N_m K_3)^2 - P_p^2} = \sqrt{(630 \cdot 2 \cdot 0,7)^2 - 625,44^2} = 314,37 \text{ квар}.$$

«С учетом того, что пропускная мощность трансформаторов превышает

реактивную мощность, потребляемую из сети, но остается ниже расчетной реактивной мощности ( $Q_3 < Q_{тр.мах} \leq Q_p$ ), можно установить компенсирующее устройство на стороне с низким напряжением или одновременно на стороне с высоким и низким напряжением. Таким образом, существует два возможных варианта размещения компенсирующей установки.» [5]

Первый вариант. Компенсирующее устройство монтируем только на низком напряжении:

$$Q_{нку} = 436,61 - 314,37 = 121,24 \text{ кВАр},$$

$$Q_m = 314,37 \text{ кВАр} ,$$

Второй вариант. Компенсирующее устройство устанавливаем на высокой и низкой стороне:

$$Q_{вкy} = Q_{mp} - Q_3 = 156,36 - 314,37 = 158,01 \text{ кВАр},$$

$$Q_{нку} = Q_{кy} - Q_{вкy} = 279,25 - 158,01 = 121,24 \text{ кВАр}$$

$$Q_m = Q_{тр.мах} = 314,37 \text{ кВАр}$$

#### Сравнение вариантов

«Технико-экономический расчет вариантов осуществляется по минимуму приведенных затрат по вариантам:

$$Z_{np} = Z_{кмп} + Z_{кy} = E_n K_{\Sigma} + C_{\Sigma}, \quad (21)$$

где  $Z_{кмп}$ ,  $Z_{кy}$  – приведенные затраты на комплектную трансформаторную подстанцию (КТП) и компенсирующие устройства (КУ);

$E_n$  – нормативный коэффициент эффективности (для объектов электроэнергетики 0,223);

$K_{\Sigma}$  – суммарные капитальные затраты на КТП и КУ;

$C_{\Sigma}$  – суммарные эксплуатационные издержки.

Суммарные капитальные затраты:

$$K_{\Sigma} = K_{mp} + K_{КТП} + K_{КУ}, \quad (22)$$

где  $K_{mp}$  – стоимость (единовременные капиталовложения) трансформаторов, руб. (табл. ПЗ.1-ПЗ.5),

$K_{КТП}$  – стоимость КТП, руб. (табл. П.4),

$K_{КУ}$  – стоимость конденсаторной установки, руб (для высоковольтных КУ – стоимость КУ и высоковольтной ячейки для ее подключения, может быть принята 100 тыс. руб.).

Суммарные эксплуатационные издержки:

$$C_{\Sigma} = C_0 (\Delta p_{mp} + \Delta p_{ВКБ} + \Delta p_{НКБ}) \quad (23)$$

где  $C_0$  – удельная стоимость потерь электроэнергии в год, руб/(кВт·год);

$\Delta p_{тр}$  – потери активной мощности в трансформаторе;

$\Delta p_{ВКБ}$ ,  $\Delta p_{НКБ}$  – удельные потери активной мощности в конденсаторных батареях, на стадии проектирования могут быть приняты 2,5 кВт/МВАр и 4,5 кВт/МВАр соответственно.

Удельная стоимость потерь электроэнергии в год по двухставочному тарифу:

$$C_0 = a \cdot 12 + b T_M, \quad (24)$$

где  $a$  и  $b$  – основная (150 руб./кВт в месяц) и дополнительная (1,02 руб./кВт×ч) ставки тарифа на активную мощность и активную электроэнергию;

$T_m$  – время использования максимума нагрузки.

Потери активной мощности в трансформаторе:

$$\Delta P_{mp} = \Delta P_{xx} + \beta^2 \Delta P_{кз}, \quad (25)$$

где  $\Delta P_{xx}$  и  $\Delta P_{кз}$  – потери холостого хода и короткого замыкания трансформатора (технические характеристики, прил. 3);

$\beta$  – реальный коэффициент загрузки трансформатора.

$$\beta = \frac{S_m}{S_{н.мп}} = \frac{\sqrt{P_p^2 + Q_m^2}}{S_{н.мп}}. \quad (26)$$

При сравнении затрат, которые не различаются более чем на 10%, рассматриваются варианты как равноэкономические. При этом предпочтение отдается варианту с лучшими техническими характеристиками, таким как компенсация на низком напряжении в двухтрансформаторной подстанции.» [10].

«Первый вариант. По  $Q_{НКВ}=258,61$  кВАр останавливаем свой выбор на ближайшей мощности батареи КРМ 0,4-260 которая имеет цену 370,7 тысяч рублей,  $Q_{НКБ}=260$  кВАр, поэтому,  $Q_T=435,61 - 260 = 175,61$  кВАр.

Для улучшения электроснабжения проектируется новая тупиковая подстанция КТП- ТК-1000/10(6)/0,4, стоимость которой составляет 195 тысяч рублей.

Внутри КТП установлен масляный трансформатор ТМГ-1000/10(6)/0,4 с схемой соединения  $\Delta/Y_n-11$ , цена которого составляет 470 тысяч рублей.

Технические характеристики трансформатора ТМГ-1000/10(6)/0,4.

$$\Delta P_{xx} = 1,4 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{кз} = 10,8 \text{ кВт}$$

Реальный коэффициент загрузки трансформатора:

$$\beta = \frac{S_m}{S_{н.тр}} = \frac{\sqrt{625,44^2 + 175,61^2}}{1000} = 0,65$$

Потери активной мощности в трансформаторе:

$$\Delta p_{тр} = 1,4 + 0,65^2 \cdot 10,8 = 9,5 \text{ кВт},$$

Удельная стоимость потерь электроэнергии в год по двухставочному тарифу:

$$C_0 = 150 \cdot 12 + 1,02 \cdot 4000 = 5880 \text{ руб/кВт} \cdot \text{год}$$

Потом можно рассчитать варианты по минимуму затрат» [3]

$$\begin{aligned} Z_{пр} &= 0,223 \cdot (370,7 + 470 + 195) + 5,88 \cdot (9,49330 + 4,50) = \\ &= 313,240 \text{ тысяч рублей.} \end{aligned}$$

Второй вариант. «По  $Q_{НКУ}=121,24$  кВАр нужно применить ближайшую по мощности батарею КРМ 0,4-120, которая имеет цену 237,65 тысяч рублей,  $Q_{НКБ}=120$  кВАр, поэтому,  $Q_T = 435,61 - 120 = 315,61$  кВАр. Для расчета трансформаторов и компенсирующих устройств в шлифовальном цехе используется радиальная схема подключения, что исключает необходимость установки шкафа ввода. Была разработана проектная документация на подстанцию 2КТП-ТК-630/10(6)/0,4, стоимостью 328 тысяч рублей.

Для расчёта трансформаторов и компенсирующих устройств в КТП использовались два масляных устройства модели ТМГ-630/10(6)/0,4 с соединением по схеме  $\Delta/Y_n-11$ , стоимость которых составляет 315 тысяч рублей.

Технические характеристики: [11], [12]

$$\Delta P_{xx} = 1 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{кз} = 7,6 \text{ кВт}$$

реальный коэффициент загрузки трансформатора:

$$\beta = \frac{S_m}{S_{н.мп}} = \frac{\sqrt{625,44 + 315,61^2}}{2 \cdot 630} = 0,56$$

Потери активной мощности в трансформаторе:

$$\Delta P_{mp} = 1 + 0,56 \cdot 7,6 = 10,24 \text{ кВт},$$

Удельная стоимость потерь электроэнергии в год:

$$C_0 = 150 \cdot 12 + 1,02 \cdot 4000 = 5880 \text{ руб/кВт} \cdot \text{год}$$

Потом можно рассчитать варианты по минимуму затрат» [3]

$$\begin{aligned} Z_{np} &= 0,2230 \cdot (237,65 + 328,0 + 315,0 \cdot 2) + 5,88 \cdot (10,243 + 4,5) = \\ &= 375,74 \text{ тысяч рублей.} \end{aligned}$$

Третий вариант. «По  $Q_{HKV}=121,24$  кВАр необходимо применить самую близкую по мощности батарею КРМ 0,4-150, которая имеет цену 237,65 тысяч рублей,  $Q_{HKB}=150$  кВАр, По  $Q_{BKV}=158,01$  кВАр необходимо применить ближайшую по мощности батарею УКРЛ 56-10,5-150 которая имеет цену 237,6 тысяч рублей,  $Q_{BKB}=120$  кВАр поэтому,  $Q_T=435,61 - 150 - 150 = 145,4$  кВАр.

Для обеспечения эффективного функционирования шлифовального цеха было принято решение использовать подстанцию 2КТП-ТК-

630/10(6)/0,4, которая имеет цену 328 тысяч рублей.

В этой подстанции размещены два масляных трансформатора ТМГ-630/10(6)/0,4 с ценой 315 тысяч рублей каждый. Они имеют схему соединения  $\Delta/Y_n-11$ . Благодаря радиальной схеме подачи напряжения, не требуется установка ТП внутри теплицы. Таким образом, сэкономлены дополнительные затраты на шкаф.

Произведем выписку характеристик:

$$\Delta P_{xx} = 1 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{кз} = 7,6 \text{ кВт}$$

Реальный коэффициент загрузки трансформатора:

$$\beta = \frac{S_m}{S_{н.мп}} = \frac{\sqrt{625,44^2 + 135,61^2}}{2 \cdot 630} = 0,51$$

Потери активной мощности в трансформаторе:

$$\Delta p_{mp} = 1 + 0,51^2 \cdot 7,6 = 10,24 \text{ кВт},$$

Удельная стоимость потерь электроэнергии в год по двухставочному тарифу:

$$C_0 = 150 \cdot 12 + 1,02 \cdot 4000 = 5880 \text{ руб/кВт} \cdot \text{год}$$

Потом можно рассчитать варианты по минимуму затрат» [3]

$$Z_{np} = 0,223 \cdot (237,6 + 237,6 + 328 + 315 + 315 \cdot 2) + 5,88 \cdot (11,639 + 4,5) = 400,541 \text{ тысяч рублей.}$$

Запишем затраты в таблицу 4.

Таблица 4 – Затраты

<i>Q<sub>НКБ</sub></i> <i>кВАр</i>	<i>Q<sub>ВКБ</sub></i> <i>кВАр</i>	<i>Q<sub>т</sub></i> <i>кВАр</i>	$\beta^2$	$\Delta P_{xx}$ <i>кВт</i>	$\Delta P_{кз}$ <i>кВт</i>	$\Delta P_{тр}$ <i>кВт</i>	<i>K<sub>тр</sub></i> <i>тысяч</i> <i>рублей</i>	<i>ККТП</i> <i>тысяч</i> <i>рублей</i>	<i>КНКБ</i> <i>тысяч</i> <i>рублей</i>	<i>КВКБ</i> <i>тысяч</i> <i>рублей</i>	<i>З<sub>пр</sub></i> <i>тысяч</i> <i>рублей</i>
260	-	175,61	0,65	1,4	10,8	9,493	470	195	370,7	-	313,24
120	-	315,61	0,56	1	7,6	10,243	630	328	237,6	-	375,74
300	158,01	135,61	0,51	1	7,6	11,639	630	328	237,6	237,6	400,54

Для определения выбора необходимых устройств для снижения потребления электроэнергии и обеспечения стабильности электроснабжения было принято решение о приобретении трансформатора ТМГ 1000/10/0,4 и конденсаторной установки КРМ 0,4-320. «Установка низковольтной батареи КРМ 0,4-320 обладает автоматическим регулированием напряжения на уровне 0,4 кВ и номинальной мощностью 320 кВАр с возможностью 13 ступеней регулирования на 25 кВАр каждая. Эти устройства предназначены для использования в помещениях без искусственного климата и относятся к 3 категории размещения для умеренного климата (У)» [8].

Выбор электрооборудования для системы электроснабжения тепличного хозяйства основывается на результатах расчета нагрузок, выбранной схеме цеховой сети и требованиях к надежности и безопасности. В этом разделе подробно рассмотрен выбор шинопроводов, кабелей, распределительных пунктов и защитной аппаратуры.

Выбор шинопроводов:

Шинопроводы являются основным элементом цеховой сети и предназначены для распределения электроэнергии между потребителями. При выборе шинопроводов учитываются следующие факторы:

Номинальный ток: Номинальный ток шинопровода должен быть не меньше расчетного тока нагрузки.

Электродинамическая стойкость: Шинопровод должен выдерживать токи короткого замыкания без механических повреждений.

Потери напряжения: Потери напряжения в шинопроводе должны быть в допустимых пределах.

Способ монтажа: учитывается способ монтажа шинопровода (настенный, потолочный, напольный).

Стоимость: при прочих равных условиях выбирается шинопровод с наименьшей стоимостью.

Ток трансформатора:

$$I_{тр.маx} = \frac{K_{д.н.} \cdot S_{н.мп} \cdot 1,2 \cdot 1000}{\sqrt{3} U_n} = 1735 \text{ А.} \quad (27)$$

«Для магистрального шинопровода выбран ШМА 4-2000-44-1 УЗ с номинальным током 2000 А.  $r_0 = 0,022 \text{ Ом} / \text{км}$ ,  $x_0 = 0,018 \text{ Ом} / \text{км}$ ,  $z\phi - 0 = 0,053 \text{ Ом} / \text{км}$ ,  $i_0 = 70 \text{ кА}$ . Защита выполнена вводным выключателем ВА Э25В Про с  $I_n = 2500 \text{ А}$ , установленном в ШНВ.

Расчет распределительных шинопроводов. Согласно ПУЭ, их необходимо выбирать по нагреву. Распределительные шинопроводы необходимо проверить также и на потерю напряжения.

Расчет ШР1, ШР2 и СП1 сведен в таблицу 5, 6 и 7, соответственно.

Для ШР1 выбираем распределительный шинопровод ШРА-1-630, типа KLM-R-07-Cu 55-4-1.  $I = 630 \text{ А}$ ,  $R_0 = 0,107 \text{ Ом} / \text{км}$ ,  $X_0 = 0,091 \text{ Ом} / \text{км}$ , динамическая стойкость  $i_{дин} = 93 \text{ кА}$  [2].

Для ШР2 выбираем распределительный шинопровод ШРА-2-250, типа KLM-R-04-Cu 55-4-1.  $I = 250 \text{ А}$ ,  $R_0 = 0,226 \text{ Ом} / \text{км}$ ,  $X_0 = 0,165 \text{ Ом} / \text{км}$ , динамическая стойкость  $i_{дин} = 41 \text{ кА}$  [2].

Для СП-1 выбирается пункт распределительный серии ПР8804-1106 Номинальный ток шкафа  $I_n = 63 \text{ А}$  с возможностью подключения до 8 трехфазных электроприемников. СП-1 подключается к ШРА-3-250 через кабель АВВГ 3 х 25 + 1 х 16 с  $I_{дд} = 87 \text{ А}$ » [22].

Таблица 5 - Расчет ШР 1

наименование	n	Руст1	Руст $\Sigma$	Ки	tg $\phi$	Рсм	Qсм	nэ	Kр	Рр	Qр	Sp	Ip
Основные насосные агрегаты	4	17	68	0,15	1,73	10,2	17,67	-	-	-	-	-	-
Дистиллятор	4	10	36	0,13	1,73	4,68	8,11	-	-	-	-	-	-
Компрессор	4	21	80	0,18	1,17	14,4	16,84	-	-	-	-	-	-
Вентилятор	4	5	16	0,85	0,75	13,6	10,20	-	-	-	-	-	-
Насос для перекачки удобрений	5	14	75	0,22	1,17	16,5	19,29	-	-	-	-	-	-
Дренажный насос	5	58	300	0,82	0,33	246	80,86	-	-	-	-	-	-
Сульфуратор	6	11	60	0,11	1,17	6,6	7,72	-	-	-	-	-	-
Мотор-редуктор зашторивания	6	18	114	0,12	1,73	13,68	23,69	-	-	-	-	-	-
Тепловая завеса (вентилятор)	2	4	6	0,82	0,75	4,92	3,69	-	-	-	-	-	-
Кран-балка	1	4	5	0,2	1,73	1	1,73	-	-	-	-	-	-
Итого силовые электроприемники	41	162	760	0,44	-	331,58	189,79	23	1,08	358,11	204,97	412,62	626,91

Таблица 6 - Расчет ШР 2

наименование	n	Руст1	РустΣ	Ки	tgφ	Рсм	Qсм	пэ	Кр	Рр	Qр	Sp	Ip
Мотор-редуктор вентиляции	9	15	135	0,12	1,17	16,2	18,94	-	-	-	-	-	-
Вентилятор	3	5	15	0,85	0,75	12,75	9,56	-	-	-	-	-	-
Сварочная машина дуговой сварки	2	17	34	0,3	1,02	10,2	10,41	-	-	-	-	-	-
Сварочный выпрямитель	8	13	104	0,3	1,17	31,2	36,48	-	-	-	-	-	-
Насос подачи воды	1	5	5	0,33	1,02	1,65	1,68	-	-	-	-	-	-
Основные насосные агрегаты	5	17	85	0,15	1,73	12,75	22,08	-	-	-	-	-	-
Дистиллятор	4	10	40	0,13	1,73	5,2	9,01	-	-	-	-	-	-
Тепловая завеса (вентилятор)	2	4	8	0,82	0,75	6,56	4,92	-	-	-	-	-	-
Кран-балка	1	4	4	0,2	1,73	0,8	1,39	-	-	-	-	-	-
Итого силовые электроприемники	35	90	430	0,23	-	97,31	114,46	30	1,12	108,987	128,2	168,27	248,65

Таблица 7 - Расчет СП 1

наименование	n	Руст1	РустΣ	Ки	tgφ	Рсм	Qсм	пэ	Кр	Рр	Qр	Sp	Ip
Вентилятор	1	5	5	0,85	0,75	4,25	3,19	-	-	-	-	-	-
Машина дуговой сварки сварочная	2	17	34	0,3	1,02	10,2	10,41	-	-	-	-	-	-
Сварочный выпрямитель	1	13	13	0,3	1,17	3,9	4,56	-	-	-	-	-	-
Насос подачи воды	1	5	5	0,33	1,02	1,65	1,68	-	-	-	-	-	-
Итого силовые электроприемники	5	40	57	0,35	-	20	19,84	3	1,12	22,4	22,22	31,55	47,93

Проектирование надежной и эффективной системы электроснабжения тепличного хозяйства требует тщательного выбора защитных аппаратов и определения сечения проводников. Этот процесс должен учитывать различные режимы работы сети – как нормальные, так и аварийные.

При выборе защиты и определении сечения проводников необходимо учитывать следующие критерии:

**Нагрев током:** Сечение проводника должно быть достаточным, чтобы предотвратить его перегрев как при длительной работе с номинальной нагрузкой, так и при кратковременных перегрузках и токах короткого замыкания. Для оценки нагрева используется ток десятиминутного максимума.

**Потери напряжения:** Потери напряжения в линии не должны превышать допустимые значения, регламентируемые нормативными документами. Чрезмерные потери напряжения могут привести к неправильной работе электроприемников и снижению их срока службы.

**Электродинамическая стойкость:** Проводники и аппараты защиты должны выдерживать электродинамические усилия, возникающие при токах короткого замыкания, без механических повреждений.

**Селективность защиты:** Система защиты должна быть селективной, то есть при возникновении короткого замыкания должен отключаться только поврежденный участок сети, а не вся система электроснабжения. Это достигается за счет правильного выбора временных характеристик защитных аппаратов.

При этом учитываются все подключенные к системе электроприемники, включая однофазные. Важно учитывать, что при питании силовой панели от щита распределения нагрузка панели должна быть включена в расчет нагрузки щита. Если расчетная мощность группы электроприемников оказывается меньше номинальной мощности самого мощного приемника в этой группе, то за расчетную мощность принимается номинальная мощность этого приемника. Это обеспечивает правильный выбор защитных аппаратов.

Сечение проводников для распределительных шинопроводов (ШР) и ответвлений от магистрального шинопровода должно быть выбрано с учетом указанных выше критериев. Точный расчет и выбор защиты проводников являются ключевыми моментами в обеспечении безопасности и эффективности работы сети электроснабжения. Недостаточное сечение проводника может привести к его перегреву и возникновению пожара, а неправильно выбранная защита может не обеспечить отключение поврежденного участка сети.

«Выбор аппаратов защиты осуществляется с учетом типа сети (осветительная или силовая), типа ламп и характера нагрузки. В Таблице 8 приведены расчетные формулы для выбора аппаратов защиты.

Таблица 8 - Расчетные формулы для выбора аппаратов защиты в осветительных и силовых сетях

Аппарат защиты	Осветительные сети		Силовые сети	
	Лампы ЛЛ и ЛН	Лампы ДРЛ, ДРИ, ДНаТ	Линии к одиночным электроприемникам	Линии к группам электроприемников
Предохранитель (тепловая вставка)	$I_3 \geq I_p$	$I_3 \geq 1,2I_p$	$I_3 \geq I_n, I_3 \geq I_{п}/\alpha$	$I_3 \geq I_{p.гр}, I_3 \geq (I_{п}^1 + I_{р}^1)/\alpha$
Автоматический выключатель с тепловым расцепителем	$I_3 \geq I_p$	$I_3 \geq 1,3I_p$	$I_3 \geq 1,25I_n$	$I_3 \geq 1,25I_p$
Автоматический выключатель с комбинированным расцепителем (эл. магнитным и тепловым)	$I_3 \geq I_p$	$I_3 \geq 1,3I_p$	$I_3 \geq 1,25I_n$ $I_{y.эp} \geq 1,2I_{п}$	$I_3 \geq 1,1I_n$ $I_{y.эp} \geq 1,2(I_{п}^1 + I_{р}^1)$

В формулах используются следующие обозначения:

$I_3$  – номинальный ток плавкой вставки или уставка теплового расцепителя автоматического выключателя.

$I_{y.эp}$  – уставка электромагнитного расцепителя мгновенного действия.

$I_p$  – расчетный ток нагрузки.

$I_n$  – номинальный ток электроприемника.

$I_n$  – пусковой ток электроприемника.» [3]

$\alpha$  – коэффициент, учитывающий условия пуска электродвигателей.

При выборе защиты для электродвигателей необходимо учитывать их пусковые токи, которые могут значительно превышать номинальные значения. Коэффициент  $\alpha$  позволяет учесть длительность пускового периода и предотвратить ложное срабатывание защиты во время пуска. Для двигателей с большими маховыми массами и длительным пуском коэффициент  $\alpha$  может быть уменьшен. Для линий, питающих электроприемники без двигателей, коэффициент  $\alpha$  не учитывается.

Расчет и выбор оборудования для ШРА-1-630:

Для шинопровода ШРА-1-630 выбираем автоматический выключатель, устанавливаемый в ответственной секции магистрального шинопровода. Номинальный ток выключателя ( $I_n$ ) должен быть не меньше расчетного тока  $I_p$ . В нашем случае, выбираем выключатель ВА-52-39 с  $I_n = 630$  А, что соответствует требованию  $I_n \geq I_p$ . Номинальный ток расцепителя  $I_{nr}$  также должен быть больше расчетного тока, и в данном случае  $I_{nr} = 630$  А, что удовлетворяет условию  $I_{nr} > 626,91$  А. Кратность тока отсечки (КОТС) принимаем равной 10, следовательно, ток отсечки  $I_{отс}$  составляет  $630 \text{ А} \cdot 10 = 6300$  А. Отключающая способность выключателя (ПКС) – 40 кА. [3], [7].

Проверяем несрабатывание отсечки при пиковом токе:  $1.3 \cdot I_{пик} \leq I_{отс}$ .  
Пиковый ток  $I_{пик}$  рассчитывается как:

$$I_{пик} = I_p + (Kn - 1) \cdot I_{н.макс}, \quad (28)$$

где  $I_p$  – расчетный ток группы,

$Kn$  – кратность пускового тока самого мощного электроприемника,

$I_{н.макс}$  – номинальный ток самого мощного электроприемника.

В данной группе самым мощным электроприемником является дренажный насос с  $P_n = 58$  кВА и  $U_n = 380$  В. Его номинальный рабочий ток  $I_n = 92,76$  А.

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos \phi} = \frac{58}{1,73 \cdot 0,38 \cdot 0,95} = 92,76 \text{ A}$$

Тогда пиковый ток группы составит:

$$I_{тик} = 626,91 + (6-1) \cdot 92,76 = 1090,71 \text{ A}$$

Проверка:

$$1,3 \cdot 1090,71 \text{ A} = 1417,92 \text{ A} \leq 6300 \text{ A}.$$

Условие выполнено.

Выбор сечения кабельной линии ответвления от магистрального к распределительному шинопроводу.

Для выбора сечения кабеля, соединяющего магистральный и распределительный шинопроводы, учитываем длительно допустимый ток (Идд) кабеля, который должен быть не меньше расчетного тока  $I_p$ . Руководствуясь ПУЭ и учитывая, что количество часов работы в году менее 4000, а напряжение сети ниже 1000 В, выбираем кабель с алюминиевыми жилами, ПВХ изоляцией и прокладкой открыто по стенам. Выбираем кабель АВВГ 2х (3х240 + 1х120) с  $I_{дд} = 718 \text{ A}$ .

Далее проверяем согласование уставки защитного аппарата  $I_z$  с выбранным сечением кабеля:

$$I_z \leq K_z \cdot I_{дд}, \quad (29)$$

где  $K_z$  – коэффициент, зависящий от типа защитного аппарата и изоляции кабеля от 0,8 до 1,25. [3].

Для автоматов с комбинированным расцепителем и кабелей с ПВХ изоляцией  $K_z = 1$ . [7].

В нашем случае  $I_3 = 630 \text{ A}$ ,  $I_{\partial\partial} = 718 \text{ A}$ .

Проверка:

$$630 \text{ A} \leq 1 \cdot 718 \text{ A}.$$

Условие выполнено.

Расчет и выбор оборудования для ШРА-2-250:

Аналогично предыдущему расчету, для ШРА-2-250 выбираем автоматический выключатель ВА-52-39 с  $I_H = 250 \text{ A}$  и  $I_{нр} = 250 \text{ A}$ .  $K_{отс} = 10$ ,  $I_{отс} = 250 \text{ A} \cdot 10 = 2500 \text{ A}$ . ПКС = 40 кА.

Проверка несрабатывания отсечки при пиковом токе: самым мощным электроприемником в этой группе является сварочная машина с  $P_H = 17 \text{ кВА}$  и  $U_H = 380 \text{ В}$ . Её номинальный рабочий ток:

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos \phi} = \frac{17}{1,73 \cdot 0,38 \cdot 0,7} = 36,9 \text{ A}$$

Пиковый ток группы:

$$I_{пик} = 248,65 \text{ A} + (6 - 1) \cdot 36,9 \text{ A} = 440,15 \text{ A}.$$

Проверка:

$$1,3 \cdot 440,15 \text{ A} = 572,2 \text{ A} \leq 2500 \text{ A}.$$

Условие выполнено.

Выбираем кабель АВВГ 3×150 + 1×70 с  $I_{\partial\partial} = 261 \text{ A}$ .

Проверка согласования:

$$I_3 = 250 \text{ A} \leq 1 \cdot 261 \text{ A}.$$

Условие выполнено.

Выбор оборудования для СП-1:

Для силовой панели СП-1 с  $I_n = 47,93$  А выбираем распределительный пункт ПР8804-1106 с номинальным током 63 А, позволяющий подключить до 8 трехфазных электроприемников. Для подключения к пункту распределения используем кабель АВВГ 3x25 + 1x16 с  $I_{\partial\partial} = 87$  А. [23]

Пусковые характеристики различных электроприемников играют важную роль при проектировании систем электроснабжения и выборе защитных устройств. Рассмотрим основные типы потребителей и их пусковые параметры:

Лампы накаливания: характеризуются высокой кратностью пускового тока, достигающей от 5 до 13 раз номинального значения. Длительность импульса пускового тока при этом относительно коротка и составляет от 0,05 до 0,3 секунды.

Электронагревательные приборы из сплавов (нихром, фехраль, хромаль): имеют небольшую кратность пускового тока, варьирующуюся в пределах от 1,05 до 1,1. Длительность импульса пускового тока значительно больше, чем у ламп накаливания, и может составлять от 0,5 до 30 секунд.

«Люминесцентные лампы с пусковыми устройствами: Кратность пускового тока невелика, составляет от 1,05 до 1,1. Длительность импульса пускового тока также небольшая – от 0,1 до 0,5 секунды.

Приборы с выпрямителем на входе блока питания: обладают средней кратностью пускового тока (от 5 до 10) и длительностью импульса от 0,25 до 0,5 секунды. Приборы с трансформатором на входе блока питания» [13]: Кратность пускового тока обычно не превышает 3, а длительность импульса составляет от 0,25 до 0,5 секунды. Устройства с электродвигателями: Кратность пускового тока для электродвигателей лежит в диапазоне от 3 до 7, а длительность импульса составляет от 1 до 3 секунд.

Выбор защитной аппаратуры и сечения проводников по цеху представлен в таблице 9.

Таблица 9 - Выбор защитной аппаратуры и сечения проводников по цеху

Наименование ЭП	$P_n$ , кВт	$I_p$ , А	$I_n$ , А	Тип пров.	$F$ , мм	$I_{дл}$ , А	Тип ЗА, А	$I_{н.а}$ , А	$I_{т.р.}$ , А	$K_{т.о}$	$I_{э.м.}$ , А	ПКС, кА	$r_0$ , МОм/м	$x_0$ , МОм/м
ШР1														
Основные насосные агрегаты	17	51,66	258,29	АПВ	25	65	АЕ2046М	63	63	12	756	6	0,74	0,091
Дистиллятор	10	30,39	151,93	АПВ	8	32	АЕ2046М	63	31,5	12	378	6	2,3	0,1
Компрессор	21	49,09	245,43	АПВ	16	55	АЕ2046М	63	50	12	600	6	1,16	0,095
Вентилятор	5	9,50	47,48	АПВ	2	14	АЕ2046М	63	8	12	96	1	9,2	0,121
Насос для перекачки удобрений	14	32,72	163,62	АПВ	16	55	АЕ2046М	63	40	12	480	6	1,16	0,095
Дренажный насос	58	92,76	556,56	АПВ	50	105	АЕ2046М	63	100	10	1000	6	0,37	0,085
Сульфуратор	11	25,71	128,56	АПВ	6	26	АЕ2046М	63	25	12	300	3	3,09	0,1
Мотор- редуктор зашторивания	18	54,70	273,48	АПВ	25	65	АЕ2046М	63	63	12	756	6	0,74	0,091
Тепловая завеса (вентилятор)	4	7,60	37,98	АПВ	2	14	АЕ2046М	63	6,3	12	75,6	1	9,2	0,121
Кран-балка	4	12,15	60,77	АПВ	2	14	АЕ2046М	63	6,3	12	75,6	1	9,2	0,121

Продолжение таблицы 9

Наименование ЭП	$P_n$ , кВт	$I_p$ , А	$I_n$ , А	Тип пров.	$F$ , мм	$I_{дл}$ , А	Тип ЗА, А	$I_{н.а}$ , А	$I_{т.р.}$ , А	$K_{т.о}$	$I_{э.м.}$ , А	ПКС, кА	$r_0$ , мОм/м	$x_0$ , мОм/м
<b>ШР2</b>														
Мотор-редуктор вентиляции	15	35,06	175,31	АПВ	16	55	АЕ2046М	63	40	12	480	6	1,16	0,095
Вентилятор	5	9,50	47,48	АПВ	2	14	АЕ2046М	63	8	12	96	1	9,2	0,121
Сварочная машина дуговой сварки	17	36,90	184,49	АПВ	16	55	АЕ2046М	63	40	12	480	6	1,16	0,095
Сварочный выпрямитель	13	30,39	151,93	АПВ	16	55	АЕ2046М	63	40	12	480	6	1,16	0,095
Насос подачи воды	5	10,85	54,26	АПВ	8	32	АЕ2046М	63	31,5	12	378	6	2,3	0,1
Основные насосные агрегаты	17	51,66	258,29	АПВ	25	65	АЕ2046М	63	63	12	756	6	0,74	0,091
Дистиллятор	10	30,39	151,93	АПВ	8	32	АЕ2046М	63	31,5	12	378	6	2,3	0,1
<b>СП1</b>														
Вентилятор	5	9,50	47,48	АПВ	2	14	АЕ2046М	63	8	12	96	1	9,2	0,121
Сварочная машина дуговой сварки	17	36,90	184,49	АПВ	16	55	АЕ2046М	63	40	12	480	6	1,16	0,095
Сварочный выпрямитель	13	30,39	151,93	АПВ	16	55	АЕ2046М	63	40	12	480	6	1,16	0,095
Насос подачи воды	5	10,85	54,26	АПВ	8	32	АЕ2046М	63	31,5	12	378	6	2,3	0,1

Таким образом, была выбрана защитная аппаратура и кабели для электроснабжения электрооборудования предприятия. Необходимо провести расчет токов короткого замыкания для проверки правильности выбранного электрооборудования. Расчет будет проведен в следующей главе.

## 2.4 Расчет токов КЗ и разработка системы РЗА

Подбор высоковольтного кабеля для соединения главного распределительного пункта (ГРП) с трансформаторной подстанцией (ТП) тепличного хозяйства — ответственный этап, требующий комплексного подхода. Необходимо учесть не только рабочие параметры, но и поведение кабеля в аварийных режимах, а также экономическую целесообразность выбора.

Основными критериями выбора высоковольтного кабеля являются:

**Экономическая эффективность.** Сечение кабеля должно быть оптимальным с точки зрения минимизации затрат на материалы и потери электроэнергии. Для этого используется понятие экономической плотности тока.

**Термическая устойчивость.** Кабель должен выдерживать воздействие токов короткого замыкания (КЗ) без повреждения изоляции и обеспечивать надежную работу системы в аварийных режимах.

**Нагрев в рабочих режимах.** Сечение кабеля должно быть достаточным для обеспечения допустимого нагрева при длительной работе с номинальной нагрузкой.

Экономически целесообразное сечение  $F_{э}$  кабеля определен исходя из максимального расчетного тока нормального режима  $I_p$  и экономической плотности тока  $j_{эК}$ :

$$F_{э} = \frac{I_p}{j_{эК}}, \quad (30)$$

«где  $I_p$  – максимальный расчетный ток нормального режима, А;  
 $j_{эк}$  – значение экономической плотности тока, А/мм<sup>2</sup>, определяемое по таблице 1.3.36» [21] или табл. П8.7 [9].

Термическая устойчивость кабеля к токам КЗ проверяется расчетом термически стойкого сечения (Fт):

$$F_m = \frac{I_\infty \sqrt{t_{пр}}}{C} \quad (31)$$

«где  $I_\infty$  – ток короткого замыкания в установившемся режиме (для источника безграничной мощности – начальное действующее значение тока короткого замыкания), кА,  
 $t_{пр}$  – приведенное время короткого замыкания;  
 $C$  – тепловая функция, зависящая от типа кабеля и напряжения питания, табл. 12. и 2.72» [9].

«Экономическая плотность тока для кабелей с бумажной изоляцией при  $T_M=4000$  часов 1,4 А/мм<sup>2</sup>.

Расчетный ток, протекающий по проводнику в нормальном режиме» [11]

$$I_p = \frac{\sqrt{P_p^2 + (Q_p - Q_{нкб})^2}}{\sqrt{3}U_n} = \frac{\sqrt{625,44^2 + (435,61 - 280)^2}}{\sqrt{3} \cdot 10} = 37,21 \text{ А,}$$

«где  $P_p$ ,  $Q_p$  – расчетные активная и реактивная мощность цеха;  
 $Q_{нкб}$  – реактивная мощность выбранной низковольтной стандартной батареи;  
 $U_n$  – номинальное напряжение высоковольтной питающей сети.»[11]

«Экономическое сечение:

$$F_9 = \frac{37,21}{1,4} = 24,2 \text{ мм}^2.$$

Полученное сечение, согласно стандартной шкале, округляем до ближайшего 25 мм<sup>2</sup>, длительно допустимый ток по табл. П8.5 –75А [21].

$$I_{тр.мах} = \frac{K_{д.л} \cdot S_{н.мп}}{\sqrt{3} U_n} = \frac{1,2 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 66,06 \text{ А} < 75 \text{ А}.$$

В данном проекте, руководствуясь рекомендациями [11] и результатами расчетов, выбран кабель марки ААБл. Для определения термически стойкого сечения рассчитывается ток короткого замыкания в начале кабельной линии, точка К1, рисунок 4» [9]

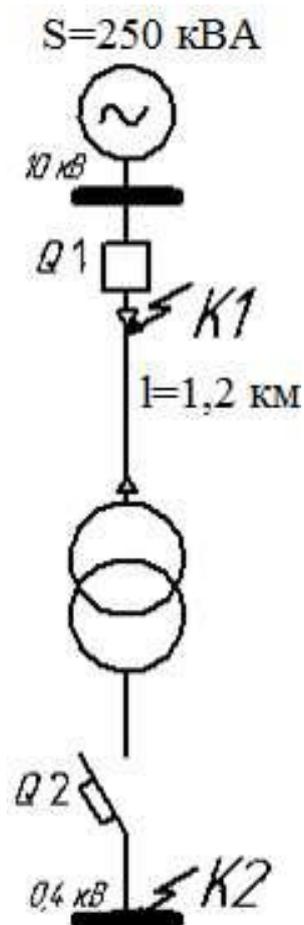


Рисунок 4 – Схема замещения

$$I_{K1} = \frac{S_k}{\sqrt{3}U_{cp}} = \frac{250}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 13,8 \text{ кА},$$

«где  $U_{cp}$  – среднее напряжение ступени КЗ, по ПУЭ принимается на 5 % больше номинального напряжения сети.» [14]

«При выборе защиты и определении сечения проводников важно учитывать, что периодическая составляющая тока короткого замыкания не затухает и равна  $I_{no} = I_{nt} = I_{\infty}$ . Эта точка короткого замыкания питается от источника безграничной мощности, что означает, что приведенное время совпадает с действительным временем действия КЗ ( $t_{пр}=t_d$ ).

$$t_d = t_3 + t_{cb} + \tau_a,$$

где  $t_3$  – время действия защиты (выдержка),

$t_{cb}$  – собственное время действия выключателя (примерно 0,1 с),

$\tau_a$  – время апериодической слагающей тока КЗ (0,01 с).

Время действия защиты зависит типа защиты, установленной на выключателе. При установке токовой отсечки (ТО)  $t_3=0$ .

$$t_d = t_{cb} + \tau_a = 0,1 + 0,01 = 0,11 \text{ с.}$$

При выборе оптимальной защиты от перегрузки и короткого замыкания, следует учитывать временные характеристики выключателей Q1 и Q2. Для обеспечения селективности в действии защиты, разница между временем срабатывания выключателей должна быть не менее 0,3 с для микропроцессорной защиты и 0,5 с для релейной защиты. Учитывая это, общее время срабатывания  $t_3$  будет равно 0,3 с (отступ от Q2) плюс 0,3 с (разница времени срабатывания) - итого 0,6 с.» [15]

$$t_d = 0,6 + 0,1 + 0,01 = 0,71 \text{ с.}$$

При ТО термически стойкое сечение:

$$F_m = \frac{13,8\sqrt{0,11}}{94} = 48,6 \text{ мм}^2.$$

При МТЗ термически стойкое сечение:

$$F_m = \frac{13,8\sqrt{0,71}}{94} = 123,4 \text{ мм}^2.$$

В системе электроснабжения тепличного хозяйства, помимо выбора кабеля, критически важно обеспечить надежную защиту трансформатора. Для этого необходимо учесть потенциальные аварийные ситуации и предусмотреть соответствующие защитные механизмы. Максимальная токовая защита (МТЗ) играет роль дополнительного уровня безопасности, предотвращая повреждение оборудования в случае нештатных ситуаций, например, при сбое в системе технического обслуживания.

В данном проекте принято решение использовать проводники сечением 50 мм<sup>2</sup> для повышения надежности системы. Выбран кабель ААБл с длительно допустимым током  $I_{\text{дд}} = 175$  А, удельным активным сопротивлением  $r_0 = 0.37$  мОм/м и удельным реактивным сопротивлением  $x_0 = 0.09$  мОм/м. Это сечение обеспечивает значительный запас по току и повышает надежность электроснабжения.

Для подключения трансформатора к главному распределительному пункту (ГРП) необходимо выбрать соответствующую ячейку. Критерии выбора ячейки основаны на соответствии ее параметров расчетным данным и условиям эксплуатации. В данном случае, после анализа доступного оборудования, была выбрана ячейка К-70 производства ЗАО Группа компаний «ЭЛЕКТРОЦИТ-ТМ Самара».

Характеристики ячейки К-70: Номинальное напряжение  $U_n$  10 кВ, что соответствует рабочему напряжению  $U_{раб} = 10$  кВ. Номинальный ток  $I_n$  630 А, что значительно превышает расчетный ток  $I_p = 66.06$  А. Динамическая стойкость к току КЗ  $i_d$  51 кА, превышает расчетный ударный ток  $i_y$ . Номинальный ток отключения  $I_{откл}$  20 кА, превышает расчетный ток короткого замыкания  $I_{п.о} = 13.8$  кА. Термическая стойкость:  $I^2t = 1200$  кА<sup>2</sup>с, что превышает расчетное значение  $I_{п.о}^2 \cdot t_{пр} = 13.8^2 \cdot 0.71 = 134.2$  кА<sup>2</sup>с.

Эти характеристики подтверждают правильность выбора ячейки К-70 для данного проекта, приведены в таблице 10.

Таблица 10 - Сравнительные данные ячейки К-70

Расчетные данные	Каталожные данные	Условия проверки
$U_{раб}=10$ кВ	$U_n=10$ кВ	$U_{раб} \leq U_n$
$I_p=66,06$ А	$I_n=630$ А	$I_p \leq I_n$
$i_y = \sqrt{2} \cdot 1,92 \cdot 13,8 = 29,9$ кА	$i_d=51$ кА	$i_y \leq i_{дин}$
$I_{п.о}=13,8$ кА	$I_{откл}=20$ кА	$I_{п.о} \leq I_{н.откл}$
$I_{п.о}^2 t_{пр} = 13,8^2 \cdot 0,71 = 85,9$ кА <sup>2</sup> с	$I_T^2 t_T = 20^2 \cdot 3 = 1200$ кА <sup>2</sup> с	$I_{п.о}^2 t_{пр} < I_T^2 t_T$

Примечание. В таблице ударный ток определен через ударный коэффициент, определенный примерно в зависимости от расположения точки КЗ по таблице 2.45 [2].

Согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ), защита трансформатора должна учитывать следующие возможные аварийные ситуации:

- многофазные замыкания на обмотках и выводах.
- однофазные замыкания на землю.
- витковые замыкания в обмотках.
- токи перегрузки.
- внешние короткие замыкания.

Для внутрицеховых трансформаторов мощностью 1000 кВА и выше предусматривается защита от понижения уровня масла и газовая защита,

реализуемые с помощью микропроцессорного блока защиты, размещенного в шкафу отходящей линии комплектного распределительного устройства (КРУ). Это позволяет обеспечить комплексную защиту трансформатора и предотвратить его повреждение в различных аварийных ситуациях.

Токовая защита (первая ступень).

«Защита от тока активируется моментально, оберегая от повреждений лишь участок проводки, который находится в непосредственной близости к электропитанию.

Ток срабатывания  $I_{c.o}$

$$I_{c.o} \geq k_n I_{к.max}^{(3)}$$

где  $k_n$  – коэффициент надежности, зависит от типа реле, для микропроцессорной защиты SEPAM согласно рекомендаций Schneider Electric, 1,1 – 1,15;

$I_{к.max}^{(3)}$  – ток короткого замыкания на НН защищаемого трансформатора, приведенный к ВН.

Для исходного примера определен ток короткого замыкания в точке К2. Схема замещения, представлена на рисунке 5.» [19]

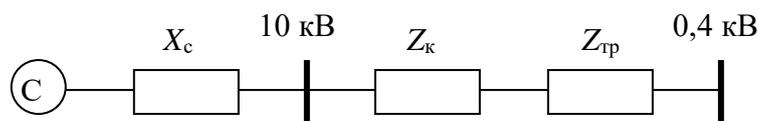


Рисунок 5 - Схема замещения

«Расчет тока КЗ ведется в именованных единицах.

Сопротивление системы, приведенное к ВН 10 кВ, определено по формуле:

$$X_c = \frac{U_{cp}^2}{S_k} = \frac{10,5^2}{250} = 0,44 \text{ Ом.}$$

Сопротивления высоковольтного кабеля:

$$R_k = r_0 l / n = 0,37 \cdot 1,2 = 0,44 \text{ Ом}$$

$$X_k = X_0 l / n = 0,09 \cdot 1,2 = 0,11 \text{ Ом}$$

где  $n$  – количество параллельно проложенных кабелей,

$l$  – длина питающего кабеля, км.

Сопротивления трансформатора, приведенные к напряжению 10 кВ:

$$R_{mp} = \frac{\Delta P_{кз} U_{cp}^2}{S_{н.мп}^2} = \frac{10800 \cdot 10,5^2}{630^2} = 1,19 \text{ Ом};$$

$$Z_{mp} = \frac{U_{кз} \% U_{cp}^2}{100 S_{н.мп}} = \frac{5,5 \cdot 10,5^2}{100 \cdot 630} = 6,06 \text{ Ом};$$

$$X_{mp} = \sqrt{Z_{mp}^2 - R_{mp}^2} = \sqrt{6,06^2 - 1,19} = 5,94 \text{ Ом};$$

где  $U_{cp}$  – среднее напряжение ступени короткого замыкания.

Суммарные сопротивления до точки К2:

$$R_{к2} = R_k + R_{тр} = 0,44 + 1,19 = 1,72 \text{ Ом};$$

$$X_{к2} = X_c + X_k + X_{тр} = 0,44 + 0,11 + 5,94 = 6,48 \text{ Ом.}$$

Ток трехфазного КЗ при повреждении за трансформатором, приведенное к ВН» [9]

$$I_{к2 \max}^{(3)} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} Z_{к2}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} * \sqrt{1,72^2 + 6,48^2}} = 0,9 \text{ кА}$$

«Первичный ток срабатывания защиты:

$$I_{c.o.1} = 1,1 * 0,9 = 0,99 \text{ кА}$$

Номинальный ток трансформатора на ВН:

$$I_{н.тр10} = \frac{S_{н.тр}}{\sqrt{3}U_{н}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 55,05 \text{ А}$$

Бросок тока намагничивания трансформатора:

$$I_{c.o.2} = k_n k_{бр} I_{н.тр10} = 1,1 \cdot 5 \cdot 55,05 = 302,78 \text{ А},$$

где  $k_{бр}$  – коэффициент броска тока намагничивания (3 – 5), принимается 5, согласно рекомендации Schneider Electric.

За расчетный ток принимается наибольший ток срабатывания защиты, т.е.  $I_{c.o} = 0,9 \text{ кА}$ .

Вторичный ток срабатывания реле, определен по формуле:

$$I_{c.p.} = \frac{K_{сх} I_{c.o}}{k_{mm}} = \frac{1 \cdot 900}{500/5} = 9,9 \text{ А}$$

где  $K_{сх}$  – коэффициент схемы, при соединении вторичных обмоток трансформатора «полная звезда» и «неполная звезда» – 1, «на разность токов двух фаз» –  $\sqrt{3}$ ;

$k_{тт}$  – коэффициент трансформации трансформатора тока.

Коэффициент чувствительности защиты определен для случая 2х фазного КЗ в конце кабельной линии:

$$I_k^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{U_{ср}}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + (X_c + X_k)^2}} = \frac{10,5}{2\sqrt{3} \cdot \sqrt{0,44^2 + (0,44 + 0,11)^2}} = 7,44 \text{ кА}$$

Коэффициент чувствительности:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к}}^{(2)}}{I_{\text{с.о}}} = \frac{7,44}{0,99} = 7,5.$$

В соответствии с ПУЭ (раздел 3.2.21 пункт 8) коэффициент чувствительности должен быть больше 2. Следовательно, защита имеет многократный запас чувствительности.» [21]

Максимально-токовая защита (вторая ступень).

«Для определения сечения проводников необходимо учитывать возможность самозапуска электродвигателей напряжением 0,4 кВ и отстраиваться от максимального рабочего тока.

Максимальный рабочий ток – ток через трансформатор с учетом перегрузки.

$$I_{\text{max}} = \frac{K_{\text{он}} S_{\text{н.мп}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н}}} = \frac{1,2 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 66,06 \text{ A}$$

Первичный ток срабатывания защиты:

$$I_{\text{с.з.}} = \frac{K_{\text{н}} K_{\text{сзн}} I_{\text{max}}}{K_{\text{в}}} = 66,06 = 244,6 \text{ A},$$

где  $K_{\text{н}}$  – коэффициент надежности, для терминалов SEPAM принимается 1,1;

$K_{\text{в}}$  – коэффициент возврата, для терминалов SEPAM принимается 0,935;

$K_{\text{сзн}}$  – коэффициент самозапуска электродвигателей обобщенной нагрузки, 2÷4.

МТЗ должна быть чувствительна к двухфазным КЗ на шинах 0,4 кВ ТП. Ток трехфазного КЗ рассчитан выше и равен 1,35 кА, двухфазный ток:

$$I_{\kappa 2}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\kappa 2 \max}^{(3)} = 0,78 \text{ кА.}$$

Коэффициент чувствительности:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\kappa 2}^{(2)}}{I_{\text{с.з.МТЗ}}} = \frac{0,78}{0,2446} = 3,2 \geq 1,5$$

Для обеспечения селективной работы защиты МТЗ, в соответствии с ПУЭ (раздел 3.2.21, пункт 1), важно учитывать, что коэффициент чувствительности МТЗ должен быть не менее 1,5 в основной зоне защиты. Рекомендации по установке защитных устройств SEPAM также предполагают использование временной ступени селективности  $\Delta t=0,3$  сек. Для оптимальной работы МТЗ необходимо учитывать время срабатывания предыдущих защитных устройств, например вводного автомата на стороне 0,4 кВ с временем срабатывания  $t_{\text{ср. пред}}=0,3$  сек.» [15]

В результате время срабатывания МТЗ определено по формуле:

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{ср. пред}} + \Delta t = 0,3 + 0,3 = 0,6 \text{ сек.}$$

Расчет уставок защиты от перегрузки с действием на сигнал (третья ступень).

«Первичный ток срабатывания защиты от перегрузки отстраивается от номинального тока трансформатора  $I_{\text{н.мп}10} = 33,03 \text{ А}$

$$I_{\text{с.з.}} = \frac{K_{\text{отс}} I_{\text{н.мп}10}}{K_{\text{в}}} = \frac{1,1 \cdot 33,03}{0,935} = 40,8 \text{ А,}$$

где  $K_{\text{отс}}$  – коэффициент отстройки, принимается 1,1;

$K_{\text{в}}$  – коэффициент возврата, для терминалов SEPAM принимается 0,935.

Срабатывание защиты на подстанции с постоянным дежурным персоналом происходит по сигналу с уставкой на время 9 секунд. Если в подстанции нет постоянного персонала, можно использовать защиту от отключения. Газовая защита активируется при низком уровне газообразования и снижении уровня масла. Для предотвращения повреждений внутри кожуха трансформатора, сопровождающихся выбросом газа, можно применить реле давления. Защита от понижения уровня масла также может быть реализована через отдельное реле уровня в расширителе трансформатора.» [10]

## **2.5 Разработки предложений по использованию ветросолнечной электростанции**

В контексте повышения энергоэффективности, снижения зависимости от традиционных источников энергии и минимизации негативного воздействия на окружающую среду, интеграция возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в систему электроснабжения тепличного хозяйства представляется перспективным направлением. Одним из наиболее целесообразных решений является использование комбинированной ветросолнечной электростанции (ВСЭС), сочетающей в себе преимущества как ветровой, так и солнечной генерации. Такой подход позволяет сгладить суточные и сезонные колебания выработки электроэнергии, характерные для каждого из этих источников по отдельности, и обеспечить более стабильное и надежное энергоснабжение объекта [24], [27].

Рассматривается вариант использования солнечных панелей, установленных на крыше теплицы, для частичного покрытия потребностей в электроэнергии, в первую очередь, для освещения и работы насосного оборудования. Данное решение позволяет снизить зависимость от внешних сетей, уменьшить счета за электроэнергию и внести вклад в экологическую устойчивость предприятия. В качестве основного источника энергии рассматривается солнечная, ввиду большей предсказуемости и простоты

интеграции в существующую инфраструктуру по сравнению с ветровой энергией для данного конкретного случая.

В качестве исходных данных принимается площадь теплицы 7200 м<sup>2</sup>. Предполагается, что 70% площади крыши может быть использовано для установки солнечных панелей, с учетом необходимости обеспечения проходов для обслуживания, а также исключения затененных участков. Выбор делается в пользу современных монокристаллических солнечных панелей, обладающих высоким КПД (около 20%) и номинальной мощностью 400 Вт (0.4 кВт) каждая. Размер одной панели принимается равным 1.7 м × 1 м, что соответствует стандартным габаритам большинства производителей.

Для расчета потенциальной выработки электроэнергии используется среднее значение годовой инсоляции для средней полосы России, составляющее примерно 1200 кВт·ч/м<sup>2</sup>/год. Этот показатель отражает количество солнечной энергии, достигающей поверхности земли в данном регионе. Также вводится коэффициент производительности (Performance Ratio, PR), равный 0.8 (80%), который учитывает неизбежные потери энергии в системе, связанные с работой инвертора, сопротивлением кабелей, загрязнением поверхности панелей и температурными эффектами. Потребляемая мощность и суточное потребление рассчитываются по данным, приведенным в предыдущих разделах. [25], [26]

Расчет полезной площади крыши:

$$S_{\text{полезн}} = S_{\text{теплицы}} \cdot K_{\text{исп}}, \quad (32)$$

где  $S_{\text{полезн}}$  - полезная площадь крыши для установки панелей, м<sup>2</sup>;

$S_{\text{теплицы}}$  - общая площадь теплицы, м<sup>2</sup>;

$K_{\text{исп}}$  - коэффициент использования площади крыши (доля площади, пригодной для установки панелей).

$$S_{\text{полезн}} = 7200 \text{ м}^2 \cdot 0.7 = 5040 \text{ м}^2.$$

Расчет количества солнечных панелей:

$$N_{панелей} = S_{полезн} / S_{панели}, \quad (33)$$

где  $N_{панелей}$  - количество солнечных панелей, шт.;

$S_{панели}$  - площадь одной солнечной панели, м<sup>2</sup>.

$$N_{панелей} = 5040 \text{ м}^2 / 1.7 \text{ м}^2/\text{панель} \approx 2964 \text{ шт.}$$

Расчет суммарной установленной мощности панелей:

$$P_{уст} = N_{панелей} \cdot P_{панели}, \quad (34)$$

где  $P_{уст}$  - суммарная установленная мощность солнечных панелей, кВт;

$P_{панели}$  - номинальная мощность одной солнечной панели, кВт.

$$P_{уст} = 2964 \text{ шт.} \cdot 0.4 \text{ кВт/шт.} = 1185.6 \text{ кВт.}$$

Расчет годовой выработки электроэнергии с 1 м<sup>2</sup>:

$$E_{м^2} = I \cdot \eta \cdot PR, \quad (35)$$

где  $E_{м^2}$  - годовая выработка электроэнергии с 1 м<sup>2</sup>, кВтч/м<sup>2</sup>/год;

$I$  - годовая инсоляция, кВтч/м<sup>2</sup>/год;

$\eta$  - КПД солнечной панели (в долях единицы);

$PR$  - коэффициент производительности системы.

$$E_{м^2} = 1200 \text{ кВтч/м}^2/\text{год} \cdot 0.2 \cdot 0.8 = 192 \text{ кВтч/м}^2/\text{год.}$$

Расчет общей годовой выработки электроэнергии:

$$E_{год} = E_{м^2} \cdot S_{полезн}, \quad (36)$$

где  $E_{год}$  - общая годовая выработка электроэнергии, кВт·ч/год.

$$E_{год} = 192 \text{ кВтч/м}^2/\text{год} \cdot 5040 \text{ м}^2 = 967680 \text{ кВтч/год}.$$

Расчет суточной выработки электроэнергии:

$$E_{сутки} = E_{год} / 365, \quad (37)$$

где  $E_{сутки}$  - суточная выработка электроэнергии, кВт·ч/сутки.

$$E_{сутки} = 967680 \text{ кВтч/год} / 365 \text{ дней} \approx 2651 \text{ кВтч/сутки}.$$

Расчет суточного потребления электроэнергии на освещение:

$$P_{сутки.осв} = P_{осв} \cdot t_{осв}, \quad (38)$$

где  $P_{сутки.осв}$  – суточное потребление электроэнергии на освещение, кВт·ч/сутки;

$P_{осв}$  – установленная мощность освещения, кВт;

$t_{осв}$  – время работы освещения, ч.

$$P_{сутки.осв} = 136,8 \text{ кВт} \cdot 12 \text{ ч} = 1641,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Расчет суточного потребления электроэнергии насосами:

$$P_{сутки.нас} = P_{нас} \cdot t_{нас}, \quad (39)$$

где  $P_{сутки.нас}$  – суточное потребление электроэнергии насосами, кВт·ч/сутки;

$P_{нас}$  – суммарная установленная мощность насосов с учетом Ки, кВт;

$t_{нас}$  – время работы насосов, ч.

$$P_{нас} = 21,06 \text{ кВт} + 2,1 \text{ кВт} + 15 \text{ кВт} + (3240 \text{ кВт} \cdot 0,8) = 230,16 \text{ кВт}$$

$$P_{сутки.нас} = 230,16 \text{ кВт} \cdot 6 \text{ ч} = 1380,96 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Расчет общего суточного потребления электроэнергии:

$$P_{сутки.общ} = P_{сутки.осв} + P_{сутки.нас}, \quad (40)$$

где  $P_{сутки.общ}$  - общее суточное потребление электроэнергии, кВт·ч/сутки.

$$P_{сутки.общ} = 1641,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч} + 1380,96 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3022,56 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Расчет доли покрытия потребностей солнечной электростанцией:

$$\text{Доля} = E_{сутки} / P_{сутки.общ}, \quad (41)$$

$$\text{Доля} = 2651 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / 3022,56 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \approx 0,877, \text{ или } 87,7\%.$$

Сравнивая суточную выработку солнечных панелей 2651 кВт·ч с общим суточным потреблением 3022,56 кВт·ч, получаем, что солнечная электростанция способна покрыть примерно 87.7% потребностей теплицы в электроэнергии для освещения и работы насосов. Этот показатель является весьма существенным и демонстрирует высокий потенциал использования солнечной энергии в данном конкретном случае.

Выводы по 2 разделу:

Для тепличного хозяйства выбрана радиальная схема электроснабжения по принципу "блок трансформатор - магистраль" с использованием шинпровода типа ШМА и ШРА. Проведен тщательный анализ и выбор высоковольтного кабеля и ячеек РП ГПП для обеспечения надежного и безопасного электроснабжения тепличного хозяйства.

### 3 Обеспечение надежности и безопасности хозяйства

#### 3.1 Разработка системы освещения

Расчет системы освещения.

Для примера выполним расчет системы освещения для участка теплицы, предназначенного для выращивания рассады, где требуется более высокий уровень освещенности.

Исходные данные:

Площадь участка:  $10 \text{ м} \times 20 \text{ м} = 200 \text{ м}^2$ .

Требуемая освещенность (для рассады): 15000 лк.

Тип светильников: Светодиодные светильники, аналог ДНаТ 600 (для простоты расчета, но с лучшей энергоэффективностью).

Световой поток одного светильника  $\Phi$ : 85000 лм.

Коэффициент использования светового потока  $\eta$ : 0.6.

Коэффициент запаса  $Kз$  1.5, учитывает снижение светового потока со временем и загрязнение светильников.

Высота подвеса светильников  $h$ : 2.5 м.

Расчет общего светового потока:

$$\Phi_{общ} = E \cdot S \cdot Kз / \eta, \quad (42)$$

где  $\Phi_{общ}$  - общий световой поток, необходимый для освещения участка,

лм;

$E$  - требуемая освещенность, лк;

$S$  - площадь участка,  $\text{м}^2$ .

Расчет количества светильников:

$$N = \Phi_{общ} / \Phi, \quad (43)$$

где  $N$  - количество светильников, шт.;

$\Phi$  - световой поток одного светильника, лм.

Размещение светильников: Равномерное распределение.

Шаг по длине:  $20\text{м} / (\sqrt{88}) \approx 2,1\text{м}$ ; Шаг по ширине:  $10\text{м}/(\sqrt{88}) \approx 1,05\text{м}$ .

Результаты расчета сведены в таблицу 11.

Таблица 11 - Результаты расчета системы освещения

Зона	Площадь, м <sup>2</sup>	Освещенность, лк	Тип светильника	Световой поток, лм	Кол-во, шт.	Шаг по длине, м	Шаг по ширине, м
Рассада	1440	15000	LED, 600	85000	635	4,7	0,5
Выращивание	4320	10000	LED, 400	55000	1964	2,7	0,8
Проходы (рабочие зоны)	720	200	LED, 150	16000	23	-	-
Проходы	720	50	LED, 70	6000	15	-	-

Выбор кабеля и защитной аппаратуры проведен в таблице 12.

Таблица 12 - Выбор кабеля и защитной аппаратуры

Зона	Мощность группы, кВт	Ток группы (220В), А	Тип кабеля	Сечение, мм <sup>2</sup>	Автомат защиты (тип, ток)
Рассада	4 (10 шт. × 400 Вт)	18.2	ВВГнг	2.5	C20
Выращивание	3 (10 шт. × 300 Вт)	13.6	ВВГнг	1.5 или 2.5	C16
Проходы (рабочие зоны)	1.5 (10 шт. × 150 Вт)	6.8	ВВГнг	1.5	C10
Проходы	0.7 (10 шт × 70 Вт)	3.2	ВВГнг	1.5	C6

Светильники подключаются группами по 10 шт. Мощность одного светильника, аналогичного ДНаТ 600, но на светодиодах – примем около 400 Вт (с учетом потерь в драйвере).

Суммарная мощность группы:  $10 \text{ шт.} \cdot 400 \text{ Вт/шт.} = 4000 \text{ Вт}$  (4 кВт).

Ток группы (при 220В):  $4000 \text{ Вт} / 220 \text{ В} \approx 18.2 \text{ А}$ .

### 3.2 Молниезащита объекта

Система молниезащиты тепличного хозяйства, в общем случае, состоит из трех основных элементов: молниеприемников, токоотводов и заземлителей. Молниеприемники предназначены для непосредственного перехвата разряда молнии и предотвращения его попадания в защищаемый объект. Токоотводы обеспечивают безопасный отвод тока молнии от молниеприемника к заземлителю. Заземлитель, в свою очередь, рассеивает ток молнии в земле, предотвращая возникновение опасных напряжений на металлических конструкциях теплицы.

Учитывая размеры теплицы (60м x 120м) и железобетонный каркас, наиболее целесообразным представляется использование комбинированной системы молниезащиты, сочетающей в себе стержневые и сетчатые элементы. По периметру крыши теплицы устанавливается молниеприемная сетка с ячейкой не более 12м x 12м, выполненная из стального оцинкованного проводника диаметром не менее 8 мм. Дополнительно, на коньках крыши (если таковые имеются) и на самых высоких точках (например, на вентиляционных шахтах) устанавливаются стержневые молниеприемники высотой 1-2 метра.

Токоотводы выполняются из того же материала, что и молниеприемники, и соединяют молниеприемную сетку и стержневые молниеприемники с заземлителем. Токоотводы прокладываются по кратчайшему пути, по возможности, вертикально, с минимальным количеством изгибов. Расстояние между токоотводами по периметру теплицы должно быть не более 25 метров для зданий III категории молниезащиты. В качестве токоотводов могут использоваться элементы металлоконструкций теплицы, при условии обеспечения надежного электрического контакта между ними.

Заземлитель молниезащиты выполнен в виде контура, проложенного в земле по периметру теплицы. Контур заземления выполнен из стальной

полосы сечением не менее 40x4 мм или круглого стального проводника диаметром не менее 10 мм. Глубина заложения заземлителя должна быть не менее 0,5 метра. Сопротивление заземляющего устройства не должно превышать 10 Ом для зданий III категории молниезащиты. Для снижения сопротивления заземления могут применяться дополнительные вертикальные электроды, забиваемые в землю на глубину до 5 метров. [6]

Определение зоны защиты одиночного стержневого молниеприемника:

$$h_0 = 0.85 \cdot h, \quad (44)$$

$$r_0 = 1.1 \cdot h, \quad (45)$$

$$r_x = 1.1 \cdot (h - h_x/0.85), \quad (46)$$

где  $h$  - высота молниеприемника, м;

$h_0$  - высота конуса защиты, м;

$r_0$  - радиус конуса защиты на уровне земли, м;

$r_x$  - радиус зоны защиты на высоте  $h_x$ , м;

$h_x$  - высота защищаемого объекта, м.

Пример расчета для  $h = 2$  м,  $h_x = 8$  м:

$$h_0 = 0.85 \cdot 2 \text{ м} = 1.7 \text{ м}.$$

Результаты расчетов представлены в таблице 13.

Таблица 13 - Результаты расчета молниезащиты

Параметр	Значение
Тип молниезащиты	Комбинированная (сетка + стержни)
Высота стержневых молниеприемников, м	1-2
Зона защиты одиночного стержня ( $h=2$ м)	Недостаточна для всей высоты
Шаг ячейки молниеприемной сетки, м	$\leq 12 \times 12$
Материал молниеприемников и токоотводов	Сталь оцинкованная ( $d \geq 8$ мм)
Материал заземлителя	Сталь оцинкованная (полоса 40x4 мм)
Сопротивление заземляющего устройства, Ом	$\leq 10$
Расстояние между токоотводами, м	$\leq 25$

Поскольку  $h_0 < h_x$ , одиночный стержневой молниеприемник высотой 2 м не обеспечивает защиту всей высоты теплицы 8 м. Требуется установка дополнительных молниеприемников или использование молниеприемной сетки.

Выводы по 3 разделу:

Разработка системы освещения теплицы основывается на многофакторном анализе, включающем агротехнические требования выращиваемых культур, нормы освещенности для производственных помещений, а также принципы электро- и пожаробезопасности. Разработка системы молниезащиты тепличного хозяйства направлена на предотвращение пожаров, повреждений оборудования и поражения электрическим током персонала и растений в результате ударов молнии.

## Заключение

В ходе выполнения данной работы были рассмотрены и проанализированы различные аспекты разработки системы электроснабжения предприятия тепличного хозяйства. Были рассмотрены основные этапы проектирования, начиная от выбора оптимальной системы электроснабжения и заканчивая анализом эффективности разработанной системы.

Для этого были рассмотрены следующие вопросы:

- рассчитано электрическое освещение;
- рассчитаны электрические нагрузки;
- выбран трансформатор подстанции цеха;
- рассчитаны токи короткого замыкания в высоковольтных цепях;
- рассчитаны токи короткого замыкания в низковольтных цепях;
- выбрано электрооборудование для электроустановок высокого напряжения;
- выбрано электрооборудование и проводники для электрических сетей низкого напряжения;
- рассчитана релейная защита высоковольтных и низковольтных цепей.

В ходе выполнения данной выпускной квалификационной работы были успешно решены все поставленные задачи, что позволило спроектировать функциональную и надежную систему электроснабжения.

На основе детального анализа электропотребления тепличного комплекса была определена расчетная мощность  $P_p = 625,44 \text{ кВт}$ , реактивная мощность  $Q_p = 435,61 \text{ кВАр}$ , полная мощность  $S_p = 762,19 \text{ кВА}$  и расчетный ток  $I_p = 1158,02 \text{ А}$ . Эти ключевые параметры легли в основу выбора основного силового оборудования.

Для предприятия выбрана радиальная схема электроснабжения по принципу "блок трансформатор - магистраль", обеспечивающая простоту эксплуатации, достаточный уровень надежности и экономическую

целесообразность. Данная схема предполагает питание электроприемников от магистрального шинпровода (ШМА), проложенного вдоль цеха, с последующим распределением через распределительные шинпроводы (ШРА) к отдельным группам потребителей.

В целях оптимизации энергопотребления и обеспечения стабильности напряжения осуществлен выбор силового трансформатора ТМГ 1000/10/0,4 и конденсаторной установки КРМ 0,4-320. Конденсаторная установка номинальной мощностью 320 кВАр с 13 ступенями регулирования по 25 кВАр обеспечит автоматическую компенсацию реактивной мощности на уровне напряжения 0,4 кВ. Выбранное оборудование соответствует категории размещения У3, что допускает его эксплуатацию в помещениях без искусственно регулируемых климатических условий.

Для организации распределения электроэнергии выбраны конкретные типы шинпроводов: для ШР1 – ШРА-1-630 (тип KLM-R-07-Cu 55-4-1) с динамической стойкостью  $i_{дин} = 93 \text{ кА}$ , для ШР2 – ШРА-2-250 (тип KLM-R-04-Cu 55-4-1) с динамической стойкостью  $i_{дин} = 41 \text{ кА}$ . Для распределительного пункта СП-1, с номинальным рабочим током, выбран шкаф серии ПР8804-1106 ( $I_N = 63 \text{ А}$ ), обеспечивающий подключение до 8 трехфазных электроприемников и подключаемый к ШРА-3-250 кабелем АВВГ 3x25+1x16 ( $I_{дд} = 87 \text{ А}$ ).

Таким образом, в работе произведен обоснованный выбор защитной аппаратуры и кабельной продукции для электроснабжения оборудования предприятия. Последующий расчет токов короткого замыкания подтвердит корректность выбора электрооборудования по условиям термической и динамической стойкости.

Все поставленные в работе задачи были решены в полном объеме, что свидетельствует о достижении цели выпускной квалификационной работы.

## Список используемых источников

1. Александров А. А., Некрасов В. М. Электроснабжение промышленных предприятий и установок: учебное пособие. – Санкт-Петербург: Лань, 2021. – 252 с. – ISBN 978-5-8114-6848-6.
2. Алиев И. И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию: учебное пособие. – 12-е изд., стер. – Москва: ИНФРА-М, 2022. – 255 с. – ISBN 978-5-16-017407-1.
3. Андреев В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учебник. – 6-е изд., стер. – Москва: Высшая школа, 2009. – 639 с. – ISBN 978-5-06-005320-3.
4. Буторин В. А. Электрические нагрузки и электропотребление промышленных предприятий: учебное пособие. – Москва: ИНФРА-М, 2021. – 240 с. – ISBN 978-5-16-015840-8.
5. Веников В. А., Глазунов А. А., Жуков Л. А. Электрические системы. Т. 1. Электрические сети: учебник. – Москва: Высш. шк., 1998. – 511 с. – ISBN 5-06-003485-8.
6. ГОСТ 12.1.030-81. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление: дата введения 1982-07-01. – Москва: Стандартинформ, 2010. – 27 с.
7. ГОСТ 31996-2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение 0,66; 1 и 3 кВ. Общие технические условия: дата введения 2014-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 75 с.
8. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: дата введения 2014-07-01. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
9. ГОСТ ИЕС 60909-3-2016. Короткие замыкания в электроустановках переменного тока. Часть 3. Расчет токов двухфазного короткого замыкания на землю в трехфазных сетях переменного тока и

однофазного короткого замыкания на землю в трехфазных и однофазных сетях: дата введения 2017-10-01. – Москва: Стандартинформ, 2017. – 56 с.

10. ГОСТ Р 50571. Электроустановки низковольтные: комплекс стандартов. – Введ. в действие с разл. дат. – Москва: Стандартинформ.

11. ГОСТ Р 52719-2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия: дата введения 2008-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2007. – 81 с.

12. ГОСТ Р 58622-2019. Трансформаторы силовые. Руководство по эксплуатации: дата введения 2020-06-01. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 74 с.

13. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов. – Москва: ЭНАС, 2009. – 456 с. – ISBN 978-5-93196-945-8.

14. Зюзев А. М. Системы электроснабжения: учебное пособие. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 344 с. – ISBN 978-5-507-46195-0.

15. Карантиров В. И. Релейная защита и автоматизация систем электроснабжения: учебник. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 372 с. – ISBN 978-5-8114-9035-7.

16. Киреева Э. А., Аракелян В. Д. Электроснабжение объектов: учебник. – Москва: ИНФРА-М, 2020. – 304 с. – ISBN 978-5-16-014280-3.

17. Конюхова Е. А. Электроснабжение объектов: учебник. – 10-е изд., стер. – Москва: Академия, 2014. – 320 с. – ISBN 978-5-4468-0670-5.

18. Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий: учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: ИНФРА-М, 2022. – 398 с. – ISBN 978-5-16-016607-6.

19. Макаров Е. Ф. Расчет и проектирование систем электроснабжения: учебное пособие. – Москва: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2021. – 287 с. – ISBN 978-5-00091-734-7, ISBN 978-5-16-016610-6.

20. Неклепаев Б. Н., Крючков И. П. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и

дипломного проектирования: учебное пособие. – 6-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2021. – 664 с. – ISBN 978-5-8114-7607-8.

21. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – Москва: [б. и.], 2003–2023. – (Актуальная редакция глав по состоянию на 01.01.2024).

22. Рожкова Л. Д., Карнеева Л. К., Чиркова Т. В. Электрооборудование электрических станций и подстанций: учебник. – 8-е изд., стер. – Москва: Академия, 2013. – 448 с. – ISBN 978-5-7695-9709-9.

23. СП 256.1325800.2016. Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа: дата введения 2017-06-25: утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 29 августа 2016 г. № 602/пр с Изменениями № 1, 2, 3, 4, 5. – Текст: электронный // КонсультантПлюс: справочно-правовая система (дата обращения: 02.05.2025).

24. Ушаков В. Я. Режимы энергосистем: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 248 с.

25. Федоров А. А., Каменева В. В. Основы электроснабжения промышленных предприятий: учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1984. – 472 с.

26. Grainger J. J. Power System Analysis / J. J. Grainger, W. D. Stevenson Jr. – New York: McGraw-Hill, 1994. – 816 p. – ISBN 978-0070612938.

27. Short T. A. Electric Power Distribution Handbook / T. A. Short. – 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 918 p. – ISBN 978-1466598652.