

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Лысьвенский филиал федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

ПЦК «ЭД»

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ (РАБОТА)

на тему «Проектирование электроснабжение цеха по производству электрических
машин в ООО "Электромашсервис"»

обучающегося группы ЭС9-22-1спо по специальности

13.02.07 «Электроснабжение (по отраслям)

Азмуков Никита Радикович

Фамилия имя отчество студента

Руководитель работы: _____ \Торощин А.К.\

Консультант по
организационно -экономической части: _____ \Стругова Л.А.\

Консультант по
охране труда _____ \ Торощин А.К.\

Рецензент: _____ \ _____ \

Допуск к защите: _____ \ Торощин А.К.\

Лысьва, 2026 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ	6
1.1. Характеристика производственного цеха.....	6
1.1.1. Краткое описание предприятия	6
1.1.2. Технологические процессы	7
1.1.3. Категория надежности приемников электроэнергии (по ПУЭ).....	10
1.1.4. Режимы эксплуатации оборудования	12
1.2. Анализ текущей системы электроснабжения.....	14
1.2.1. Структура электроснабжения ООО «Электромашсервис»	14
1.2.2. Основные проблемы существующего решения.....	15
1.3. Нормативная база проектирования	18
1.4. Оптимальная структура распределения электроэнергии.....	21
Вывод по разделу	23
2 КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ	24
2.1 Расчет электрических нагрузок цеха.....	27
2.2.1 Определение центра электрических нагрузок (ЦЭН) для выбора места расположения ЦТП	33
2.2.2 Техничко-экономический расчёт (выбор мощности трансформаторов)..	36
2.2.3 Расчёт компенсации реактивной мощности (УКРМ).....	38
2.3 Проектирование внутрицеховой сети	39
2.3.1 Выбор схемы электроснабжения.....	39
2.3.2 Расчёт токов короткого замыкания (ТКЗ) в установках до 1000 В	40
2.3.3 Выбор сечения проводников (кабелей, шинопроводов).....	41
2.3.4 Выбор коммутационной аппаратуры и устройств защиты.....	42
2.4 Расчёт освещения производственного цеха	44
2.4.1 Выбор источника света с учётом условий среды	44
2.4.2 Расчёт освещённости методом коэффициента использования светового потока (для общего освещения) и точечным методом (для местного)	44
2.4.3 Проектирование осветительной сети и выбор щитов освещения (ЩО)	46

2.5. Выбор вводно-распределительных устройств (ВРУ, ГРЩ)	47
2.5.2 Спецификация оборудования и материалов.....	48
3 ОХРАНА ТРУДА И ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ.....	52
3.1 Мероприятия по электробезопасности при эксплуатации спроектированной сети.....	52
3.1.1 Расчет защитного заземления (контура заземления) и зануления.....	52
3.1.2 Организация безопасного обслуживания электроустановок.....	54
3.2 Производственная санитария и гигиена труда.....	55
3.2.1 Анализ вредных факторов производства.....	55
3.2.2 Обеспечение микроклимата и вентиляции в зонах пропитки и литья ...	56
4 ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	59
4.1 Исходные данные для расчёта	59
4.2 Капитальные вложения (КВ)	60
4.3.1 Амортизационные отчисления	61
4.3.2 Затраты на техническое обслуживание и ремонт	62
4.3.3 Стоимость потерь электроэнергии до и после модернизации.....	62
4.3.4 Снижение полезного потребления за счёт модернизации освещения ...	63
4.3.5 Итоговые эксплуатационные расходы.....	64
4.4 Предотвращённый ущерб от аварий и простоев.....	64
4.5 Годовой экономический эффект.....	65
4.6 Показатели экономической эффективности.....	65
4.6.1 Простой срок окупаемости.....	65
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	67
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	70

ВВЕДЕНИЕ

В условиях активной промышленной модернизации проектирование и реконструкция систем электроснабжения (СЭС) становятся важнейшей задачей российских предприятий. Устаревшая энергетическая инфраструктура машиностроительного завода, такого как ООО «Электромашсервис», снижает надежность энергоснабжения и увеличивает потери электроэнергии. Поэтому ввод нового оборудования предполагает переосмысление подхода к проектированию системы электроснабжения с учетом текущих потребностей и нормативных требований.

Цель дипломной работы — разработать проект модернизированной системы электроснабжения цеха производства электрических машин.

Основные задачи включают:

Анализ технологического процесса цеха и определение категорий надежности энергопотребителей.

Оценку действующей схемы электроснабжения, выявление сильных и слабых сторон.

Расчет электрических нагрузок и обоснование выбора схемы подключения и основных компонентов электрооборудования (трансформаторы, кабельная продукция, защитные аппараты).

Решение вопросов компенсации реактивной мощности.

Объект и предмет исследования

Объект: Система электроснабжения цеха производства электрических машин ООО «Электромашсервис».

Предмет: Методы и принципы проектирования надежной, экономически целесообразной и безопасной системы электроснабжения, включая схему сети и параметры оборудования.

1 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ

1.1. Характеристика производственного цеха

1.1.1. Краткое описание предприятия

ООО «Электромашсервис» (г. Лысьва, Пермский край) занимается производством электродвигателей, генераторов и трансформаторов (ОКВЭД 27.11). Производственный цех — ключевая единица предприятия, определяющая особенности используемого технологического оборудования и соответствующие требования к электроснабжению.

Электроснабжение и инженерные системы

Для электроснабжения производственной площадки реализован проект с установкой комплектной трансформаторной подстанции (КТП) 2×1250 кВА/6/0,4 кВ. Питание осуществляется от ГПП-1 по двум независимым вводам (ячейки №15 и №28), что обеспечивает II категорию надёжности электроснабжения. Суммарная установленная мощность — 2325 кВт, расчётный ток — до 179 А. Все кабельные линии выполнены бронированным кабелем АВБбШв-6 3×95 мм², с прокладкой в траншеях, трубах и кабельных лотках, с обязательным заземлением и сигнальной лентой. В здании КТП реализовано заземляющее устройство с сопротивлением не более 4 Ом, все металлоконструкции и лотки заземлены в соответствии с ПУЭ и СП.

Производственные участки и оснащение

В структуре производственного цеха выделяются следующие основные участки:

- механический участок (оборудован шкафами управления, аппаратами защиты, сварочными постами);
- участок плазменной резки (расположен у входа, оснащён мощными автоматическими выключателями);
- участок сборки и штамповки;
- компрессорная станция;
- индукционный регулятор для технологических процессов.

Внутреннее распределение электроэнергии выполнено по современной однолинейной схеме с секционированием, АВР (автоматическим вводом резерва), защитой от перегрузок и коротких замыканий. В качестве коммутационных аппаратов используются вакуумные выключатели, автоматические выключатели на различные номиналы (от 250 до 2000 А), реле тока и времени, а также современные приборы учёта и контроля.

Техническое оснащение и безопасность

В составе КТП применяются:

- два трансформатора ТСЛЗ 1250/6/0,4 кВ;
- вакуумные выключатели ВВ/TEL-6-20/630;
- современные счётчики электроэнергии СЭТ-4ТМ.03М.01;
- реле защиты и автоматики;
- кабельные линии, заземляющие устройства, сигнальные ленты.

Все работы по монтажу и наладке выполнены специализированной организацией с соблюдением требований ПУЭ, СП 31-110-2003, СП 76.13330.2016 и других действующих стандартов. Проект прошёл согласование в сетевой организации ООО «ВАКС», а также внутреннюю проверку и утверждение в ООО «Электромашсервис».

Организационные аспекты

Проектирование выполнено инженерами предприятия с привлечением специалистов, включённых в Национальный реестр специалистов в области инженерных изысканий и архитектурно-строительного проектирования. Все этапы работ от разработки до сдачи объекта сопровождались техническим контролем, проверкой и утверждением ответственными лицами.

1.1.2. Технологические процессы

Производственный цикл на предприятии организован по принципу последовательного прохождения заготовки через основные технологические участки. Каждый этап оснащён современным оборудованием и автоматизированными системами управления, что обеспечивает высокое качество продукции и безопасность труда.

1. Входной контроль и подготовка заготовок

Поступающие на склад металлические заготовки (листы, профильный прокат) проходят визуальный и инструментальный контроль на соответствие чертежам и техническим условиям. Проверяется геометрия, отсутствие дефектов (трещин, расслоений, коррозии).

Оборудование:

1. Измерительный инструмент (штангенциркули, микрометры, рулетки).
2. Стеллажи для хранения.
3. Грузоподъёмные механизмы (кран-балка, тельфер).
2. Механическая обработка (Механический участок)

На этом этапе выполняются операции по изменению формы и размеров заготовок:

1. Резка: Раскрой листового металла на заготовки заданного размера.
2. Штамповка: Придание деталям необходимой формы с помощью прессового оборудования.
3. Сверловка и обработка отверстий: Подготовка мест под крепеж и соединения.

Оборудование:

1. Гильотинные ножницы или станки плазменной резки.
2. Гидравлические или кривошипные прессы.
3. Сверлильные станки.
3. Термическая и антикоррозийная обработка

Для повышения прочности и долговечности изделий применяются методы термической обработки (закалка, отпуск) в зависимости от марки стали. После этого детали проходят подготовку поверхности:

Очистка от окалины и загрязнений (пескоструйная или дробеструйная обработка).

Нанесение защитных покрытий (грунтовка, окраска, оцинковка).

Оборудование:

1. Термические печи.
2. Пескоструйные камеры.
3. Окрасочные камеры с системой вентиляции.
4. Сборка узлов и агрегатов

Процесс: Обработанные детали поступают на сборочный участок. Здесь происходит соединение отдельных элементов в готовые узлы или изделия с помощью болтовых соединений, сварки или клепки. Проводится промежуточный контроль качества сборки.

Оборудование:

1. Сборочные станды и верстаки.
2. Сварочные посты (для вспомогательных операций).
5. Сварочные работы

Ключевой этап соединения металлических конструкций. Применяются современные методы сварки для обеспечения герметичности и прочности швов. Сварочные посты оборудованы системами местной вытяжной вентиляции для удаления сварочных газов.

Оборудование:

1. Сварочные полуавтоматы (MIG/MAG) или инверторы.
2. Сварочные столы с вытяжкой.
6. Участок плазменной резки

Используется для высокоточной фигурной резки сложных контуров в металле большой толщины. Процесс автоматизирован, что минимизирует человеческий фактор и повышает точность геометрии деталей.

Оборудование:

Станок плазменной резки с ЧПУ (числовым программным управлением).

7. Финальная сборка и испытания

Готовые узлы собираются в финальное изделие. Проводятся функциональные испытания (проверка работоспособности, герметичности,

электрических параметров — если это электрооборудование). Изделие маркируется согласно технической документации.

Оборудование:

1. Испытательные стенды.
2. Контрольно-измерительные приборы (мультиметры, мегаомметры).
8. Контроль качества (ОТК)

На протяжении всего цикла производства осуществляется многоступенчатый контроль:

1. Входной: проверка сырья.
2. Операционный: контроль параметров в процессе обработки (размеры, качество реза/сварки).
3. Приёмочный: финальная проверка готового изделия на соответствие ГОСТам и ТУ перед отгрузкой.
9. Складирование и отгрузка

Готовые изделия упаковываются в защитную тару или консервационную смазку для предотвращения повреждений при транспортировке и хранении на складе готовой продукции до момента отправки заказчику.

Таким образом, технологический процесс на ООО «Электромашсервис» представляет собой замкнутый цикл от сырья до готового изделия с высоким уровнем механизации и строгим контролем качества на каждом этапе.

1.1.3. Категория надежности приемников электроэнергии (по ПУЭ)

Приемники делятся на три группы по степени допустимости перерыва питания:

Первая категория: Перерыв питания недопустим (угроза безопасности персонала, нарушение непрерывности технологического цикла). Включены печи, вентиляция, контрольно-измерительные приборы и автоматика (КИПиА), аварийное освещение.

Вторая категория: Допустима краткосрочная остановка подачи электроэнергии (ограниченные производственные потери). Это намоточные станки, пропиточные агрегаты, транспортеры сборки, общее освещение.

Третья категория: Остальные менее важные потребители (складские помещения, второстепенное оборудование).

Обоснование отнесения к категориям для ООО «Электромашсервис»

Принятое распределение основано на следующих факторах:

Анализ технологического процесса – наличие термических печей непрерывного действия, сварочных постов с выделением вредных газов, точных металлорежущих станков с ЧПУ.

Нормативные требования – ПУЭ п. 1.2.18–1.2.20 обязывают для производств с взрывопожароопасной и токсичной средой применять I категорию для вентиляции и КИПиА.

Экономическая целесообразность – отнесение дорогостоящего оборудования (печей, станков ЧПУ) к I и II категориям предотвращает значительные убытки от брака и простоев.

Существующая схема электроснабжения – цех уже подключен по двум независимым вводам 6 кВ от ГПП-1, что технически позволяет обеспечить I и II категории без дополнительных затрат.

Таким образом, для цеха производства электрических машин ООО «Электромашсервис» установлены следующие категории надежности:

1 категория: Электropечи, вентиляция и газоудаление, КИПиА и автоматика печей, АВР, аварийное освещение

2 категория: Металлорежущие станки, прессы, сварочное оборудование, основные компрессоры, рабочее освещение, конвейеры сборки

3 категория: Складские помещения, бытовые розетки, второстепенная вентиляция

Данное распределение соответствует требованиям ПУЭ и обеспечивает баланс между надежностью работы и экономическими затратами на резервирование.

1.1.4. Режимы эксплуатации оборудования

Режим эксплуатации — это совокупность условий, в которых работает оборудование, определяемых величиной нагрузки, частотой включений/отключений, параметрами питающей сети и окружающей средой. Правильное определение и соблюдение режимов работы является ключевым фактором, обеспечивающим надёжность, долговечность и безопасность электроустановок.

Для цеха ООО «Электромашсервис» можно выделить несколько основных режимов эксплуатации оборудования.

1. Режим работы силовых трансформаторов (КТП 2×1250 кВА)

Трансформаторы являются самым дорогостоящим и ответственным оборудованием в системе электроснабжения. Их режимы работы делятся на несколько категорий.

Продолжительный режим (S1)

Это основной режим работы для трансформаторов в данном цехе. Он характеризуется постоянной нагрузкой, близкой к номинальной, в течение длительного времени (часы, смены).

— Характеристика: Температура обмоток и масла достигает установившегося значения, при котором количество выделяемого тепла равно количеству отводимого в окружающую среду.

— Влияние: Работа с нагрузкой 70–90% от номинальной является оптимальной. Это обеспечивает высокий КПД и не приводит к перегреву изоляции.

— Риски: Длительная работа с перегрузкой (более 110–120% от номинала) приводит к ускоренному старению изоляции (диэлектрического масла и бумажной изоляции обмоток), что резко сокращает срок службы трансформатора (с 25 лет до 5–7 лет).

Кратковременный и повторно-кратковременный режимы

Эти режимы нехарактерны для силовых трансформаторов, но важны для другого оборудования (см. ниже). Для трансформатора опасны именно пусковые токи со стороны 0,4 кВ, которые создают кратковременные электродинамические усилия в обмотках.

2. Режим работы асинхронных электродвигателей

Двигатели компрессоров, насосов и вентиляторов работают в более сложных режимах.

Продолжительный режим с переменной нагрузкой (S6)

Это наиболее частый случай для промышленного привода.

— Характеристика: Двигатель работает с циклически изменяющейся нагрузкой (например, работа/пауза или изменение производительности).

— Влияние: Постоянные пуски и остановки вызывают повышенный износ подшипников и изоляции из-за высоких пусковых токов (в 5–7 раз выше номинального).

— Риски: Частые пуски могут привести к перегреву обмоток даже при малой полезной работе. Для таких двигателей важен правильный подбор мощности (с небольшим запасом) и использование устройств плавного пуска (УПП) или частотных преобразователей.

Кратковременный режим (S2)

Работа в течение короткого, заранее заданного времени (например, 30 или 60 минут) с последующим длительным отключением для остывания.

— Характеристика: Двигатель успевает нагреться до высокой температуры, но не до установившейся.

— Влияние: Позволяет использовать двигатели с повышенной перегрузочной способностью.

3. Режимы работы коммутационной аппаратуры

Автоматические выключатели и контакторы имеют свои специфические режимы.

Коммутационный режим

Это основной режим для выключателей. Он характеризуется включением/отключением токов нагрузки и, что самое важное, токов короткого замыкания.

— Влияние: Каждое отключение тока КЗ вызывает износ дугогасительной камеры. Ресурс выключателя по этому параметру ограничен (измеряется в количестве циклов «включение-отключение»).

— Риски: Использование автоматических выключателей для пуска мощных двигателей (вместо контакторов) приводит к их быстрому износу из-за воздействия пусковых токов.

4. Влияние качества электроэнергии на режимы

Параметры сети напрямую влияют на работу оборудования:

— Просадки напряжения: При пуске мощного компрессора напряжение в сети цеха падает. Это приводит к тому, что другие двигатели (например, на вентиляторах) могут не запуститься («опрокидывание» ротора) или будут работать с повышенным скольжением, что вызывает их перегрев.

— Перекос фаз: Неравномерное распределение однофазных нагрузок по фазам приводит к перекосу. В трёхфазных двигателях это вызывает появление тока в нейтрали, вибрацию и дополнительный нагрев обмоток.

1.2. Анализ текущей системы электроснабжения

1.2.1. Структура электроснабжения ООО «Электромашсервис»

Внешняя подача электроэнергии: Основной источник — распределительное устройство ЗРУ-6 кВ главной понижающей подстанции (ГПП-1). Цех подключается двумя ячейками №15 и №28, обеспечивая резервирование второй категории надежности.

Внутрицеховое питание: Подключено к комплектной трансформаторной подстанции (КТП) мощностью два трансформатора по 1250 кВА каждый (6/0,4 кВ). Распределительное устройство низкого напряжения (РУ-0,4 кВ) разделено на секции с системой автоматического ввода резерва (АВР).

Кабельная сеть: Используется алюминиевый бронированный кабель типа АВБбШв-6 3×95 мм². Способ прокладки — траншеи и специальные лотки.

1.2.2. Основные проблемы существующего решения

Анализ проектной и рабочей документации, а также изучение структуры распределения электроэнергии на предприятии ООО «Электромашсервис» позволяют выявить ряд системных проблем и «узких мест» в существующем решении. Несмотря на соответствие современным нормам, реализация проекта имеет конструктивные и организационные недостатки, которые могут привести к снижению эффективности, рискам для безопасности и сложностям в дальнейшей эксплуатации.

1. Концентрация нагрузок и отсутствие зонального распределения

В существующей схеме силовые шкафы (ШР) и мощные потребители (печи, компрессор) подключены к шинам РУ-0,4 кВ КТП без явного зонального разделения. Это приводит к тому, что все магистральные линии сходятся в одной точке.

Сложность локализации аварии: При возникновении короткого замыкания на одной из отходящих линий (например, в ШР-3 или на участке плазменной резки) срабатывает вводной автомат 2000А. Это приводит к полному обесточиванию всей секции, включая освещение и оборудование на других участках, которые могли быть исправны.

Риск ложных срабатываний: Пусковые токи мощных асинхронных двигателей (компрессора, насосов) суммируются на вводе, что может приводить к ложным отключениям защит.

2. Недостаточная селективность защит

Суть проблемы: В иерархии аппаратов защиты наблюдается большой разрыв в номиналах токов. Например, после вводного автомата 2000А следуют групповые автоматы на 630А, 400А и 250А.

Последствия:

Отсутствие каскадирования: При коротком замыкании на линии, защищенной автоматом 250А, теоретически должен сработать только он. Однако из-за высоких токов КЗ и времени срабатывания вышестоящего аппарата (630А или 2000А), существует риск его повреждения или одновременного отключения. Это усложняет поиск места повреждения.

Риск для кабеля: Кабельные линии между автоматами 2000А и 630А могут не обладать достаточной термической стойкостью при протекании токов короткого замыкания до момента срабатывания защиты.

3. Устаревшая элементная база (Ретрофит)

Суть проблемы: Проект предусматривает «ретрофит» (модернизацию) существующих ячеек ЗРУ-6кВ на ГПП-1. Это подразумевает установку современного оборудования (вакуумных выключателей ВВ/TEL) в старые, физически изношенные корпуса ячеек.

Последствия:

Снижение надёжности: Старый корпус может иметь микротрещины, нарушения уплотнений и устаревшие механизмы привода. Это сводит на нет часть преимуществ нового оборудования.

Ограниченный доступ для обслуживания: Компоновка старых ячеек часто неудобна для работы с современным оборудованием, что увеличивает время ремонта.

Отсутствие мониторинга: В отличие от новых КРУ (комплектных распределительных устройств), старые ячейки не имеют систем диагностики и мониторинга состояния оборудования.

4. Организация кабельных трасс

Суть проблемы: Прокладка большого количества силовых кабелей (АВБбШв-6) и контрольных кабелей в общих траншеях и лотках без строгого разделения по назначению.

Последствия:

Электромагнитные наводки: Силовые кабели, идущие в одном лотке с контрольными кабелями (сигнализация, управление), создают наводки. Это

может приводить к сбоям в работе автоматики и ложным срабатываниям датчиков.

Тепловой режим: Плотная укладка кабелей снижает теплоотвод, что ведёт к ускоренному старению изоляции и сокращению срока службы кабельной линии.

5. Недостатки системы заземления

Суть проблемы: Хотя сопротивление контура заземления соответствует норме, реализация заземления металлоконструкций и лотков выполнена перемычками ПуГВ с двух сторон. В местах соединений (болтовых) со временем из-за коррозии переходное сопротивление будет расти.

Последствия:

Потенциал на корпусах: При ухудшении контакта на перемычке корпус шкафа или лотка может оказаться под напряжением относительно земли, что смертельно опасно для персонала.

Неэффективность защиты: УЗО (устройства защитного отключения) или диф. автоматы могут не сработать корректно из-за утечек тока через плохие контакты заземления.

6. Освещение и качество электроэнергии

Суть проблемы: Общая структура сети не предусматривает глубокого разделения силовых и осветительных нагрузок. Пуск мощных индуктивных нагрузок (печей, компрессоров) вызывает значительные «просадки» напряжения во всей сети цеха.

Последствия:

Мерцание света: Лампы освещения будут мерцать при каждом пуске мощного двигателя, что вредно для зрения персонала и некомфортно.

Сбои электроники: Чувствительная электроника (контроллеры ПЛК, частотно-регулируемые приводы) может давать сбои или выходить из строя из-за нестабильного напряжения.

В результате осмотра существующей системы, решения являются функциональными и безопасными «на бумаге», но их реализация содержит

ряд критических недостатков. Основные проблемы связаны с недостаточной селективностью защит, концентрацией нагрузок в одной точке и использованием устаревшей инфраструктуры. Это создаёт риски массовых отключений при локальных авариях

1.3. Нормативная база проектирования

Проектирование системы электроснабжения производственного цеха ООО «Электромашсервис» велось в строгом соответствии с действующей нормативной базой Российской Федерации. Это гарантирует безопасность, надёжность, энергоэффективность и юридическую легитимность объекта.

Ниже приведена подробная структура нормативной базы, разделённая по ключевым направлениям.

1. Основные федеральные законы и технические регламенты

Это фундамент, определяющий общие требования к безопасности зданий и сооружений.

—Федеральный закон № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». Устанавливает минимально необходимые требования к зданиям, включая системы электроснабжения, для обеспечения механической безопасности, пожарной безопасности и безопасности для здоровья человека.

—Федеральный закон № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». Определяет требования к электроустановкам в части предотвращения возникновения источников зажигания, обеспечения работоспособности систем противопожарной защиты (пожарная сигнализация, системы дымоудаления) в условиях пожара.

—Градостроительный кодекс РФ. Регулирует вопросы экспертизы проектной документации, получения разрешения на строительство и ввода объекта в эксплуатацию.

—Ключевые своды правил (СП) и ГОСТы

—Эти документы содержат конкретные технические требования к проектированию, монтажу и эксплуатации.

—Электротехнические установки и сети

—ПУЭ (Правила устройства электроустановок), 7-е издание. Это основной «закон» для любого электрика и проектировщика. В проекте учтены главы:

Глава 1.1: Общая часть.

Глава 1.2: Электроснабжение и электрические сети.

Глава 1.7: Заземление и защитные меры электробезопасности.

Глава 2.1: Электропроводки.

Глава 4.1: Распределительные устройства напряжением до 1 кВ.

Глава 6.1: Электрооборудование жилых и общественных зданий (в части общих требований).

—СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа». Хотя объект промышленный, этот свод правил содержит актуальные требования к выбору кабелей, аппаратов защиты (автоматических выключателей) и расчёту нагрузок.

—СП 76.13330.2016 «Электротехнические устройства»(актуализированная редакция СНиП 3.05.06-85). Регламентирует правила производства электротехнических монтажных работ.

Проектирование и строительство

—СП 256.1325800.2016 (см. выше).

—СП 31-110-2003 «Проектирование и монтаж электроустановок жилых и общественных зданий». Используется как справочный материал для организации схем питания, так как содержит типовые решения по групповым сетям, которые адаптированы для производственных нужд.

—СП 484.1311500.2020 «Системы пожарной сигнализации и автоматизация систем противопожарной защиты». Определяет требования к

проектированию систем пожарной сигнализации, которые интегрируются с электроснабжением.

Кабельные линии

—ГОСТ Р 50571.5.52-2011/МЭК 60364-5-52:2009 «Электроустановки низковольтные. Часть 5-52. Выбор и монтаж электрооборудования. Электропроводки». Основной документ по прокладке кабелей.

—Типовой альбом А11-2011 «Прокладка кабелей напряжением до 35 кВ в траншеях с применением двустенных гофрированных труб». Использован в проекте как прямое руководство по технологии прокладки кабельных линий (глубина траншеи, песчаная подушка, сигнальная лента).

3. Организационно-распорядительная документация

Это документы, подтверждающие легитимность самого процесса проектирования и квалификации исполнителей.

—Технические условия (ТУ). Выданы сетевой организацией ООО «ВАКС» от 24.03.2023 г. Это главный документ, определяющий точку подключения, категорию надёжности электроснабжения (в данном случае — II категория), разрешённую мощность и особые условия присоединения.

—Техническое задание (ТЗ). Выдано заказчиком (ООО «Электромашсервис»). Содержит исходные данные для проектирования: состав нагрузок, расположение оборудования, требования к автоматизации.

—Свидетельство о членстве в СРО (Саморегулируемой организации). Проектная организация должна состоять в СРО в области инженерных изысканий и архитектурно-строительного проектирования (в данном случае — членство в НОПРИЗ). Это подтверждает право на выполнение таких работ.

—Уведомление о включении в Национальный реестр специалистов (НРС). Подтверждает квалификацию главного инженера проекта (ГИП) или главного специалиста проекта (ГСП). В документах упоминается специалист Ширинкин А.А., включённый в реестр НОПРИЗ.

1.4. Оптимальная структура распределения электроэнергии

Структура электроснабжения цеха спроектирована с учётом требований надёжности, безопасности, удобства обслуживания и возможности расширения производства. В основе лежит принцип двухступенчатого распределения с разделением на силовые и осветительные сети, а также секционирование для повышения живучести системы.

1. Источники питания и вводные устройства

Система строится на базе двух независимых вводов, что обеспечивает II категорию надёжности электроснабжения (согласно ПУЭ).

Ввод №1 и Ввод №2: Питание осуществляется от ГПП-1 (Городская/Главная понижающая подстанция) через ячейки №15 и №28. Каждый ввод рассчитан на суммарную установленную мощность 1162,5 кВт и ток до 89,5 А.

ЗРУ-6 кВ (Закрытое распределительное устройство): Здесь происходит приём высокого напряжения (6 кВ). Проектом предусмотрен ретрофит ячеек, монтаж современных защит (РЗиА) и установка узла учёта на границе балансовой принадлежности.

КТП-2х1250/6/0,4 кВ: Комплектная трансформаторная подстанция, понижающая напряжение до потребительского уровня 0,4 кВ. Состоит из двух силовых трансформаторов ТСЛЗ-1250/6/0,4 кВ.

2. Главная распределительная сеть (РУ-0,4 кВ)

Это «сердце» внутренней сети цеха. Оптимальная структура здесь — двухсекционная с системой АВР (Автоматический Ввод Резерва).

1. Секционирование: Шины низкого напряжения (0,4 кВ) внутри КТП разделены на две секции. Это позволяет:

Равномерно распределять нагрузку между трансформаторами.

Обеспечивать бесперебойную работу части оборудования при выводе одной из секций в ремонт.

2. Секционный выключатель (3QF, 2000А): Связывает две секции. В нормальном режиме он может быть либо отключен, либо включен для

параллельной работы. При аварии на одной из вводных линий или трансформаторе система АВР автоматически отключает повреждённый источник и включает секционный выключатель, запитывая обе секции от оставшегося в работе ввода.

3. Вводные автоматы (1QF, 2QF, 2000А): Защищают вводные кабели и трансформаторы от токов короткого замыкания и перегрузки.

3. Распределение по потребителям (Магистральные и радиальные линии)

От шин РУ-0,4 кВ отходят магистральные линии, питающие групповые распределительные щиты (ШР — Шкафы Распределительные) и отдельные мощные потребители.

1. Групповые щиты (ШР): Каждый участок цеха имеет свой щит управления.

2. Механический участок: Питается через ШР-4 и РП-7.

3. Участок сборки/штамповки: Питается через ШР-3.

4. Компрессорная: Питается через отдельную линию (2GF3, 400А).

5. Печи индукционного нагрева: Имеют выделенные линии с соответствующей защитой.

6. Радиальные линии: Питают единичные мощные агрегаты напрямую от главного щита КТП (например, печи, крупные сварочные посты).

4. Схема заземления и молниезащиты

Безопасность является неотъемлемой частью структуры распределения.

Заземляющее устройство (ЗУ): Выполнено из угловой стали 63х63х5 мм и полосы 4х40 мм.

Заземление оборудования: Рама трансформаторов соединена с контуром в двух местах. Все кабельные лотки заземлены перемычками ПуГВ 1х16 мм² с двух сторон, обеспечивая непрерывность цепи.

5. Осветительная сеть

Для исключения влияния пусковых токов мощных двигателей на освещение и чувствительную электронику, осветительная сеть выполнена по автономной схеме:

1. Осветительные линии подключаются к отдельным секциям шин РУ-0,4 кВ или имеют свои групповые щиты.
2. Это гарантирует стабильное напряжение для освещения даже при резких просадках напряжения, вызванных пуском мощных асинхронных двигателей компрессоров или печей.

Преимущества данной структуры

1. Живучесть: При аварии на одном вводе или трансформаторе цех продолжает работать на 50% мощности без остановки производства.
2. Гибкость: Возможность поэтапного подключения нового оборудования без полной реконструкции сети.
3. Безопасность: Развитая система защит (дифференциальная, тепловая, от КЗ) и качественное заземление минимизируют риски поражения током и пожаров.
4. Качество электроэнергии: Секционирование и разделение нагрузок предотвращают перекося фаз и просадки напряжения на чувствительном оборудовании.

Вывод по разделу

Разработка современной системы электроснабжения цеха ООО «Электромашсервис» представляет собой комплексную техническую задачу. Текущая инфраструктура обладает достаточным потенциалом, однако для эффективного функционирования необходимо произвести детальный расчет электрических нагрузок, подобрать рациональные схемы энергообеспечения, установить современные системы защиты и компенсаторы реактивной мощности, соблюдая действующие нормативные акты.

2 КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ

Настоящий расчёт выполнен для механического отделения цеха производства электрических машин ООО «Электромашсервис» (г. Лысьва, Пермский край). Предприятие специализируется на выпуске электродвигателей, генераторов и трансформаторов (ОКВЭД 27.11). Механическое отделение оснащено широкой номенклатурой токарных, фрезерных, сверлильных, расточных, шлифовальных станков, прессового, сварочного и термического оборудования, компрессорами, лазерными и плазменными установками, системами вентиляции и абразивоструйной обработки.

Таблица 1- Перечень электрооборудования механического отделения цеха

Нумерация	Наименование ЭО	Мощность, кВт
1	Фрезерный HaiSEN MLH1275B	25 кВт
2	Токарный HaiSEN CK6180*2000	15 кВт
3	Токарный ЧПУ CW K6163	11 кВт
4	Фрезерный станок ВФС-1330Ф1	5.5 кВт
5	Сверлильный Z3050	4 кВт
6(3шт)	Пресс-автомат с ЧПУ A0920	3 кВт*3

Продолжение таблицы 1

7	Токарный станок с ЧПУ Ck6160 ONSLATHE	11 кВт
8	Шкаф управления печью НК151510	52 кВт
9	Шкаф управления печью НК151510	52 кВт
10	Гильотинные ножницы Н3121	18.5 кВт
11(2 Шт)	Сварочный аппарат СВАРОГ MIG 500	24.7 кВт*2
12	Система удаление сварочных газов KEMPER	5.5 кВт
13	Машина точечной сварки BSP 216 S1	12 кВт
14	HySpeed Plasma HSD130	19.5 кВт
15	Ленточный станок СН-400	3 кВт
16	Шкаф управления печью ПВП 152015	245 кВт
17	Электроды ПП450	380 кВт
18	Электроды НКО7.7.10	380 кВт
19	Токарный станок KC50B-1500N	7.5 кВт
20	Токарный станок CW6280B	11 кВт

Продолжение таблицы 1

21	Токарный станок Dalian C5116	30 кВт
22	Расточной станок FEMCOBMC-110R1	22 кВт
23	Плоскошлифовальный станок 3Л722В	11 кВт
24	Токарный станок HaiSEN C5123	30 кВт
25	Эколазер ECO 4 HC/S	4 кВт
26	Электрическая режущая машина Q11-3X1250A	4 кВт
27	Вертикально-сверлильный станок 2Н135	4 кВт
28	Лазер VNITER	3 кВт
29	Токарный станок ДИП 400	18.5 кВт
30	Токарный станок CW61100x2000	22 кВт
31	Токарный станок с ЧПУ HaiSENCWK6163x2000	11 кВт
32(2шт)	Пресс однокривошипный КД 2130	11 кВт*2
33	Портальный станок PierceRur 2500 GP	4.6 кВт
34	Абразивоструйная кабина Contracor	1.5 кВт

35	Камера абразивоструйная КСО-200-Н-ФВР-М-А	4 кВт
36	Токарный станок СА6160х1000	7.5 кВт
37	Компрессор ВК20Е-15-500Д	15 кВт
38	Компрессор Atlas Copco GA 11 FF	11 кВт
39	Винтовой компрессор Sollant SLT-37	37 кВт
40	Винтовой компрессор ISO UPD-37	37 кВт
41	Холодильный осушитель воздуха RDS-872-1.6	1.5 кВт
42	Промышленный охладитель воды CWFL-2000ANS	3.21 кВт
43	Воздушный кондиционер СА-300S	0.3 кВт
44	Осушитель HD-20GF	0.9 кВт
45	Осушитель RFDA 141	0.61 кВт
46	Холодильный чиллер LC 72.01-A.2.55	8.1 кВт

2.1 Расчет электрических нагрузок цеха

$P_{эл}$ — номинальная мощность электроприёмника, кВт;

n — фактическое число электроприёмников в группе;

P_H - сумма номинальных мощностей в группе, кВт;
 K_H – коэффициент использования электроприёмников;
 $\cos\varphi$ – коэффициент активной мощности;
 $\operatorname{tg}\varphi$ – коэффициент реактивной мощности;
 m – показатель силовой сборки в группе;
 P_{CM} – средняя активная мощность за наиболее загруженную смену, кВт;
 Q_{CM} - средняя реактивная мощность за наиболее загруженную смену, квар;
 S_{CM} – средняя максимальная мощность за наиболее загруженную смену, кВА;
 $n_{\text{э}}$ – эффективное число электроприёмников;
 K_M – коэффициент максимума активной нагрузки;
 K'_M – коэффициент максимума реактивной нагрузки;
 P_M – максимальная активная нагрузка, кВт;
 Q_M – максимальная реактивная нагрузка, квар;
 S_M – максимальная полная нагрузка, кВА;
 I_M – максимальный ток, А.

Определение активной, реактивной, полной мощности за смену.

$$P_{CM} = K_H * P_H$$

$$P_H = P_{\text{ЭП}} * n$$

$$Q_{CM} = P_{CM} * \operatorname{tg}\alpha$$

$$S_{CM} = \sqrt{P_{CM}^2 + Q_{CM}^2}$$

Таблицы 2 - Группировка электроприемников и исходные данные

№ групп ы	Тип оборудования	Колич ество, шт.	$P_{\text{ном.}}$ сум, кВт	K_H	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$
-----------------	------------------	------------------------	----------------------------------	-------	---------------	---------------

1	Металлорежущие станки (токарные, фрезерные, сверлильные, расточные, шлифовальные, ленточнопильные, порталные)	27	298,6	0,17	0,65	1,17
2	Прессы, ножницы, режущие машины (пресс-автоматы, гильотинные ножницы, кривошипные прессы, электр. режущая машина)	7	53,5	0,20	0,65	1,17
3	Сварочное оборудование (MIG 500, точечная сварка)	3	61,4	0,25	0,55	1,52
4	Электропечи и шкафы управления (термические печи)	5	1099	0,75	0,95	0,33
5	Компрессоры и осушители, чиллеры, кондиционеры	9	97,52	0,70	0,80	0,75
6	Вентиляция и удаление газов	1	5,5	0,60	0,80	0,75
7	Лазеры, плазменная резка	3	26,5	0,50	0,80	0,75
8	Абразивоструйное оборудование	2	5,5	0,50	0,70	1,02

Примечания к таблице:

Для группы 1 собраны: фрезерные (25 + 5,5), токарные (15+11+11+7,5+11+30+22+11+30+18,5+22+11+7,5), сверлильные (4+4), расточной (22), шлифовальный (11), ленточнопильный (3), порталный (4,6). исключены

Группа 2: пресс-автоматы 3×3 кВт, гильотинные ножницы 18,5, прессы 2×11, электр. режущая машина 4.

Группа 3: сварочные аппараты 2×24,7, машина точечной сварки 12.

Группа 4: два шкафа НК151510 (52+52), шкаф ПВП 152015 (245), печи ПП450 (380) и НКО7.7.10 (380).

Группа 5: компрессоры (15+11+37+37), осушители (1,5+0,9+0,61), чиллер (8,1), охладитель воды (3,21), кондиционер (0,3).

Группа 6: система удаления сварочных газов 5,5 кВт.

Группа 7: HySpeedPlasma 19,5, Эколазер 4, лазер VNITER 3.

Группа 8: абразивоструйная кабина 1,5 и камера 4 кВт.

Расчет средних мощностей за смену ($P_{см}$, $Q_{см}$, $S_{см}$)

Формулы:

$$P_{см} = K_{и} \cdot P_{ном. сум}$$

$$Q_{см} = P_{см} \cdot \tan \varphi$$

$$S_{см} = \sqrt{P_{см}^2 + Q_{см}^2}$$

$$m = \frac{S_{м}}{\sqrt{3} \cdot U_H}, \text{ где } U_H = 0,38$$

Таблица 3 - Расчет средних мощностей за смену

Группа	$P_{ном. сум}$, кВт	$K_{и}$	$\tan \varphi$	$P_{см}$, кВт	$Q_{см}$, квар	$S_{см}$, кВА
1	298,6	0,17	1,17	50,76	59,39	78,11
2	53,5	0,20	1,17	10,70	12,52	16,47
3	61,4	0,25	1,52	15,35	23,33	27,92
4	1099	0,75	0,33	824,25	272,00	867,82
5	97,52	0,70	0,75	68,26	51,20	85,34
6	5,5	0,60	0,75	3,30	2,48	4,13
7	26,5	0,50	0,75	13,25	9,94	16,56
8	5,5	0,50	1,02	2,75	2,81	3,93

Определение эффективного числа электроприемников ($n_{э}$) и коэффициента максимума (K_m)

Для каждой группы рассчитываем показатель силовой сборки $m = P_{max} / P_{min}$ (по номинальным мощностям отдельных приемников в группе). В данном случае для упрощения принимаем, что группы состоят из одинаковых или близких по мощности приемников, поэтому $n_{э} \approx n$ (фактическому количеству). Значения K_m выбираем по таблицам для соответствующих $n_{э}$ и средневзвешенного $K_{и.ср}$ группы.

Таблица 4–Эффективность числа электроприемников

Группа	Количество n	Ки.ср	nэ	Км (актив)	Км' (реактив)
1	27	0,17	27	1,05	1,0*
2	7	0,20	7	1,52	1,1**
3	3	0,25	3	2,09	1,1
4	5	0,75	5	1,12	1,0
5	9	0,70	9	1,10	1,0
6	1	0,60	1	2,00	1,1
7	3	0,50	3	1,45	1,1
8	2	0,50	2	1,75	1,1

Расчет максимальных нагрузок (Рм, Qм, Sм, Iм)

Формулы:

$$P_m = K_m \cdot P_{cm}$$

$$Q_m = K_m' \cdot Q_{cm}$$

$$S_m =$$

$$I_m =, \text{ где } U_n = 0,38$$

Таблица 5-Максимальная нагрузка

Группа	P_m , кВт	Q_m , квар	S_m , кВА	I_m , А
1	$50,76 \times 1,05 = 53,30$	$59,39 \times 1,0 = 59,39$	80,32	122,0
2	$10,70 \times 1,52 = 16,26$	$12,52 \times 1,1 = 13,77$	21,31	32,4
3	$15,35 \times 2,09 = 32,08$	$23,33 \times 1,1 = 25,66$	41,08	62,4
4	$824,25 \times 1,12 = 923,16$	$272,00 \times 1,0 = 272,00$	962,73	1463,3
5	$68,26 \times 1,10 = 75,09$	$51,20 \times 1,0 = 51,20$	90,84	138,0
6	$3,30 \times 2,00 = 6,60$	$2,48 \times 1,1 = 2,73$	7,15	10,9
7	$13,25 \times 1,45 = 19,21$	$9,94 \times 1,1 = 10,93$	22,05	33,5
8	$2,75 \times 1,75 = 4,81$	$2,81 \times 1,1 = 3,09$	5,72	8,7

Общие нагрузки по цеху (суммирование с учетом разнородности)

Для определения общих максимальных нагрузок цеха применяем метод суммирования с коэффициентом одновременности Код (для промышленных цехов обычно 0,85–0,95). Принимаем Код=0,9.

$$P_{м.цех} = 0,9 \cdot (53,30 + 16,26 + 32,08 + 923,16 + 75,09 + 6,60 + 19,21 + 4,81) = 0,9 \cdot 113$$

$$0,51 \approx 1017,46 \text{ кВт}$$

$$Q_{м.цех} = 0,9 \cdot (59,39 + 13,77 + 25,66 + 272,00 + 51,20 + 2,73 + 10,93 + 3,09) = 0,9 \cdot 43$$

$$8,77 \approx 394,89 \text{ квар}$$

$$S_{м.цех} = \sqrt{1017,46^2 + 394,89^2} \approx 1091,9 \text{ кВА}$$

$$I_{м.цех} = \frac{1091,9}{\sqrt{3} \cdot 0,38} \approx 1657,6 \text{ А}$$

2.2.1 Определение центра электрических нагрузок (ЦЭН) для выбора места расположения ЦТП

Для определения места установки цеховой трансформаторной подстанции (ЦТП) необходимо найти центр электрических нагрузок (ЦЭН) – точку на плане цеха, в которой сумма моментов активных нагрузок относительно координатных осей минимальна. Это позволяет сократить длину питающих и распределительных сетей, снизить потери электроэнергии и затраты на кабельную продукцию.

Исходные данные

План цеха (масштаб 1:100) с размерами: длина 138 м, ширина основной части 23,24 м.

Система координат выбрана следующим образом:

Ось X – горизонтальная (вдоль длины цеха), начало (0) – левая граница цеха.

Ось Y – вертикальная (вдоль ширины цеха), начало (0) – нижняя граница цеха (ось A).

Координаты центров групп электроприёмников определены по плану (см. таблицу 6).

Таблица 6 - Расположение групп оборудования на плане

№ группы	Тип оборудования	P_m , кВт	Координаты центра, м	
			X	Y
1	Металлорежущие станки	53,3	45	12
2	Прессы, ножницы, режущие машины	16,3	60	10
3	Сварочное оборудование	32,1	70	15
4	Электропечи	923,2	100	12

	(термические)			
5	Компрессоры, осушители, чиллеры	75,1	20	18
6	Вентиляция (удаление сварочных газов)	6,6	72	8
7	Лазеры, плазменная резка	19,2	85	16
8	Абразивоструйное оборудование	4,8	90	5

Пояснения к координатам:

Компрессорная расположена в левой части цеха (X=20 м) у наружной стены (Y=18 м).

Основной парк металлорежущих станков сосредоточен в центральной левой части (X=45 м, Y=12 м).

Прессы и ножницы – ближе к середине (X=60 м).

Сварочные посты – в зоне сборки (X=70 м).

Термические печи – в правой части (X=100 м), так как это наиболее мощные и крупногабаритные установки.

Плазменная резка и лазеры – между сварочным участком и печами (X=85 м).

Абразивоструйная кабина – в правом нижнем углу (X=90 м, Y=5 м).

Вентиляция – рядом со сварочными постами (X=72 м, Y=8 м).

Расчёт координат ЦЭН

Центр электрических нагрузок определяется по формулам:

$$X_{\text{ЦЭН}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{mi} \cdot X_i}{\sum_{i=1}^n P_{mi}}, Y_{\text{ЦЭН}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{mi} \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^n P_{mi}}$$

Вычисления сведены в таблицу 7.

Таблица 7 - Расчёт взвешенных сумм

Группа	P_M , кВт	X , м	Y , м	$P_M \cdot X$	$P_M \cdot Y$
1	53,3	45	12	2398,5	639,6
2	16,3	60	10	978,0	163,0
3	32,1	70	15	2247,0	481,5
4	923,2	100	12	92320,0	11078,4
5	75,1	20	18	1502,0	1351,8
6	6,6	72	8	475,2	52,8
7	19,2	85	16	1632,0	307,2
8	4,8	90	5	432,0	24,0
Σ	1130,6	—	—	101984,7	14098,3

Анализ и выбор места установки ЦТП

Полученные координаты ЦЭН: $X = 90,2$ м, $Y = 12,5$ м. Эта точка расположена в правой части цеха (ближе к термическим печам), что объясняется их доминирующей мощностью (923 кВт из 1131 кВт общей активной нагрузки).

Однако на плане цеха уже указано «Предполагаемое место установки КТП» – примерно в районе между осями 15–16 по длине и между осями В–Г по ширине. Пересчитаем координаты этого места:

Ось 15 находится на расстоянии: $(15-1) \times 6$ м = 84 м (при шаге колонн 6 м).

Ось 16 – 90 м. Середина ≈ 87 м.

По ширине: ось В – примерно 12 м, ось Г – 18 м, середина ≈ 15 м.

Таким образом, существующее предполагаемое место (≈ 87 м; 15 м) достаточно близко к рассчитанному ЦЭН (90,2 м; 12,5 м). Отклонение составляет ~ 3 м по Х и $\sim 2,5$ м по Y, что допустимо с учётом конструктивных ограничений (расположение колонн, проездов, систем вентиляции).

Окончательное решение

Принимаем расположение КТП в соответствии с проектным планом – между осями 15–16 и В–Г. Это обеспечивает:

- минимальную протяжённость питающих кабелей от КТП до основных потребителей (особенно до печей и компрессоров);
- удобный ввод внешнего питания (рядом с вводными ячейками);
- соответствие требованиям пожарной безопасности (КТП не находится под краном, не блокирует проходы).

Вывод: Центр электрических нагрузок цеха определён в точке с координатами $X=90,2$ м, $Y=12,5$ м. Фактическое расположение КТП (в районе осей 15–16 / В–Г) практически совпадает с ЦЭН, поэтому дополнительного переноса не требуется.

2.2.2 Технико-экономический расчёт (выбор мощности трансформаторов)

Исходные данные:

Полная расчётная нагрузка цеха $S_m=1092$ $S_m=1092$ кВА.

Категория надёжности электроснабжения – II (по ПУЭ). Для II категории требуется два независимых ввода, допустим перерыв на время включения резерва.

Напряжение питающей сети – 6 кВ, напряжение на стороне НН – 0,4 кВ.

Существующая КТП укомплектована двумя трансформаторами ТСЛЗ-1250/6/0,4 кВ.

Выбор числа трансформаторов:

Для II категории применяются двухтрансформаторные подстанции. При отказе одного трансформатора второй должен обеспечить питание всех потребителей II категории с учётом допустимой перегрузки.

Допустимые перегрузки (по ГОСТ 14209-85):

Для трансформаторов с масляным охлаждением допускается систематическая перегрузка до 1,5 номинальной мощности в часы максимума при коэффициенте начальной загрузки $\leq 0,93$.

Аварийная перегрузка (продолжительностью не более 6 часов) может достигать $1,4 S_{ном} S_{ном}$ при условии, что до аварии трансформатор был недогружен.

Проверка существующих трансформаторов 2×1250 кВА:

Коэффициент загрузки в нормальном режиме:

$$K_3 = \frac{S_M}{2 \cdot S_{ном}} = \frac{1092}{2 \cdot 1250} = 0,437$$

(низкая загрузка, но допустима, особенно с учётом перспективного роста нагрузок).

Послеаварийный режим (отключение одного трансформатора): оставшийся трансформатор должен взять на себя всю нагрузку цеха.

$$K_{з.ав} = \frac{S_M}{S_{ном}} = \frac{1092}{1250} \approx 0,874$$

Это меньше 1,4, значит, аварийная перегрузка допустима.

Экономически целесообразная загрузка для двухтрансформаторной подстанции в нормальном режиме составляет 0,65–0,75. Недогрузка (0,44) приводит к некоторому увеличению потерь холостого хода, но позволяет иметь резерв для развития производства.

Технико-экономическое сравнение (альтернативы):

Возможные варианты:

2×1000 кВА – в нормальном режиме $K_3=1092/2000=0,546$; в послеаварийном $1092/1000=1,092$ – перегрузка 9,2%, что допустимо, но при росте нагрузок потребуется замена.

2×1250 кВА (существующий) – $K_{3.норм}=0,437$; $K_{3.ав}=0,874$ – запас значительный.

2×1600 кВА – избыточно.

Приведённые затраты (ориентировочные) для 2×1250 кВА с учётом более низких потерь при недогрузке и возможности дальнейшего расширения без замены трансформаторов делают этот вариант предпочтительным. Поэтому оставляем существующие трансформаторы 2×1250 кВА.

Приняты два трансформатора мощностью по 1250 кВА. Коэффициент загрузки в нормальном режиме 0,44, в послеаварийном – 0,87, что соответствует требованиям ПУЭ для II категории.

2.2.3 Расчёт компенсации реактивной мощности (УКРМ)

Цель: повысить коэффициент мощности $\cos \varphi$ цеха до значения, рекомендуемого энергоснабжающей организацией (обычно 0,92–0,95), и снизить нагрузку на трансформаторы и кабели.

Исходные данные:

$P_M=1017$ кВт, $Q_M=395$ квар, $S_M=1092$,

$1\cos\varphi_1=P/S=1017/1092\approx 0,931$ – уже достаточно высокий.

Однако в исходном файле указаны мощности электроприёмников, и при детальном учёте сварочных агрегатов, печей и компрессоров $\cos\varphi$ может быть ниже. Для демонстрации методики примем требуемый $\cos\varphi_2=0,96$.

$$\tan\varphi_1=\frac{Q}{P}=\frac{395}{1017}\approx 0,388, \cos\varphi_1=0,931\Rightarrow \tan\varphi_1=0,388$$

$$\cos\varphi_2=0,96\Rightarrow \tan\varphi_2=\sqrt{\frac{1}{0,96^2}-1}\approx 0,291$$

требуемая мощность конденсаторной установки (УКРМ):

$$Q_k = P_m \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) = 1017 \cdot (0,388 - 0,291) \approx 98,6 \text{ квар.}$$

Округляем до стандартного значения – 100 квар.

Выбор типа УКРМ:

Для цеха с большим количеством двигателей и печей рекомендуются автоматические установки (УКРМ-0,4) с регулированием по току или по $\cos \varphi$ $\cos \varphi$.

Место установки – на шины 0,4 кВ КТП (по одному блоку на каждую секцию по 50 квар или один общий с автоматическим переключением).

Устанавливаем УКРМ-0,4-100-10% с автоматическим регулятором (ступени 10, 20, 30, 40 квар).

В реальности при $\cos \varphi = 0,93$ компенсация не обязательна, но расчёт показывает, что даже небольшое повышение до 0,96 даёт снижение полной мощности и потерь. Для более точного расчёта следует взять фактические значения $\tan \varphi$ по каждой группе.

2.3 Проектирование внутрицеховой сети

2.3.1 Выбор схемы электроснабжения

Схема силовой сети: радиально-магистральная.

От РУ-0,4 кВ КТП отходят магистральные линии к распределительным пунктам (РП) и шкафам (ШР), установленным в зонах сосредоточения нагрузок.

Крупные потребители (печи, компрессоры) питаются по отдельным радиальным линиям.

Осветительная сеть – отдельные групповые щитки (ЩО), подключаемые к независимым секциям шин КТП, чтобы пуски двигателей не вызывали мерцание освещения.

Примерная структура (по группам из предыдущего расчёта):

Таблица 8 – Оборудование электроснабжения

Группа	Распределительный пункт	Потребители (станки, оборудование)
--------	-------------------------	------------------------------------

1	ШР-1 (металлорежущие)	Токарные, фрезерные, сверлильные, шлифовальные
2	ШР-2 (прессы, ножницы)	Прессы, гильотина, режущая машина
3	ШР-3 (сварочное)	Два сварочных аппарата, точечная сварка
4	РП-4 (печи)	Электropечи и шкафы управления (отдельные линии)
5	ШР-5 (компрессоры)	Компрессоры, осушители, чиллеры, кондиционеры
6	ЩО (освещение)	Светильники цеха и аварийное освещение

Схема подключения:

ШР-1, ШР-2, ШР-3, ШР-5 – питание от секции 1 КТП.

РП-4 (печи) – питание от секции 2, так как печи создают нелинейные искажения; лучше отделить от станков.

ЩО – подключить к обеим секциям через АВР, чтобы при отключении одной секции освещение сохранялось.

2.3.2 Расчёт токов короткого замыкания (ТКЗ) в установках до 1000 В

Расчёт необходим для выбора аппаратов защиты на термическую и динамическую стойкость, а также для проверки чувствительности защит.

Схема замещения – от шин 6 кВ ГПП до точки КЗ на шинах 0,4 кВ КТП.

Исходные данные:

Мощность системы на шинах 6 кВ: $S_{к.з.сист}=200$ МВА (типовое значение для промышленных сетей).

Трансформатор КТП: $S_{ном}=1250$ кВА, $U_k=5,5\%$, потери КЗ $P_k=11$ кВт.

Длина кабеля 6 кВ от ГПП до КТП – 50 м, кабель АВБбШв-6 3×95 мм², $x_0=0,08$, $r_0=0,326$ Ом/км (при 20°C).

Расчёт сопротивлений (в именованных единицах, приведённых к стороне 0,4 кВ):

Сопротивление системы:

$$X_{\text{сист}} = \frac{U_{\text{ср.нн}}^2}{S_{\text{к.з.сист}}} = \frac{0,4^2}{200} = 0,0008 \text{ Ом}$$

Сопротивление кабеля 6 кВ (приведённое к НН):
Коэффициент трансформации $K_{\text{тр}}=6000/400=15$.

$$R_{\text{к}}=r_0 \cdot L / K_{\text{тр}}^2 = 0,326 \cdot 0,05 / 15^2 = 0,0163 / 225 \approx 0,0000724 \text{ Ом}$$

$$X_{\text{к}}=x_0 \cdot L / K_{\text{тр}}^2 = 0,08 \cdot 0,05 / 225 = 0,004 / 225 \approx 0,0000178 \text{ Ом}$$

Сопротивление трансформатора:

$$R_{\text{тр}} = \frac{P_{\text{к}} \cdot U_{\text{нн}}^2}{S_{\text{нн}}^2} = \frac{11 \cdot 10^3 \cdot 0,4^2}{1250^2} = \frac{11 \cdot 160}{1562500} \approx 0,001126 \text{ Ом}$$

$$Z_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{к}} \cdot U_{\text{нн}}^2}{100 \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{5,5 \cdot 0,16}{100 \cdot 1,25} = 0,00704 \text{ Ом}$$

$$X_{\text{тр}} = \sqrt{Z_{\text{тр}}^2 - R_{\text{тр}}^2} = \sqrt{0,00704^2 - 0,001126^2} = 0,00695 \text{ Ом}$$

Суммарное сопротивление до шин 0,4 кВ:

$$R_{\text{сум}}=R_{\text{к}}+R_{\text{тр}} \approx 0,000072+0,001126=0,001198 \text{ Ом}$$

$$X_{\text{сум}}=X_{\text{сист}}+X_{\text{к}}+X_{\text{тр}} \approx 0,0008+0,000018+0,00695=0,007768 \text{ Ом}$$

$$Z_{\text{сум}} = \sqrt{0,001198^2 + 0,007768^2} \approx 0,00786 \text{ Ом}$$

Трёхфазный ток КЗ на шинах 0,4 кВ:

$$I_{\text{к.з}} = \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\text{сум}}} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,00786} = 29,4 \text{ кА}$$

2.3.3 Выбор сечения проводников (кабелей, шинопроводов)

Выполняется по трём условиям:

По нагреву длительным расчётным током: $I_{доп} \geq I_p$.

По экономической плотности тока: $F_{эк} = I_p / j_{эк}$, где $j_{эк}$ зависит от числа часов использования максимума $T_{мТм}$. Для $T_{мТм} \approx 5000$ ч $j_{эк} = 1,4$ А/мм² (кабель с алюминиевыми жилами).

По допустимой потере напряжения: $\Delta U \leq 5\%$ (для силовых сетей).

Пример расчёта для кабеля, питающего ШР-1 (группа 1, $I_p = 122$ А):

По нагреву: выбираем кабель с алюминиевыми жилами, изоляция ПВХ, прокладка в лотках. По ПУЭ для 122 А требуется сечение 50 мм² ($I_{доп} = 130$ А при 30°C).

По экономической плотности: $F_{эк} = 122 / 1,4 = 87,1$ мм². Ближайшее стандартное – 95 мм².

По потере напряжения: длина кабеля от КТП до ШР-1 – 40 м. Для 95 мм² $r_0 = 0,32$ Ом/км, $x_0 = 0,06$ Ом/км.

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I_p \cdot L \cdot (r_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi) / 1000$$

$$\cos \varphi = 0,65, \sin \varphi = 0,76.$$

$$\Delta U = 1,73 \cdot 122 \cdot 0,04 \cdot (0,32 \cdot 0,65 + 0,06 \cdot 0,76) = 8,44 \cdot (0,208 + 0,0456) = 8,44 \cdot 0,2536 \approx 2,14 \text{ В}$$

В процентах: $(2,14 / 380) \cdot 100\% \approx 0,56\%$ – допустимо.

Окончательно принимаем кабель АВВГ 3×95 + 1×50 для ШР-1. Аналогично рассчитываются сечения для других линий. Для вводного кабеля 0,4 кВ от КТП до распределительных шкафов используется шинопровод типа ШМА (медный или алюминиевый) на ток до 1600 А.

2.3.4 Выбор коммутационной аппаратуры и устройств защиты

Основные критерии:

Номинальное напряжение ($U_n \geq 400$ В).

Номинальный ток ($I_{н.расц} \geq I_p$).

Предельная коммутационная способность ($I_{откл} \geq I_{к.з.}$ в месте установки).

Селективность (ступенчатость характеристик срабатывания).

Примеры выбора автоматов (на основе расчётных токов групп и $TK3 \approx 30 \text{ кА}$):

Таблица 9 - Коммутационная аппаратура и устройства защиты

Место установки	Расчётный ток, А	Тип автомата	Номинальный ток расцепителя, А	Характеристика	Иоткл, кА
Ввод 1 КТП	$1658 / 2 = 829$	ВА 57-41	1000	D	35
Секционный	1658	ВА 57-41	2000	D	35
ШР-1 (станки)	122	ВА 57-35	160	D	30
ШР-2 (прессы)	32,4	ВА 57-35	40	C	20
ШР-3 (сварка)	62,4	ВА 57-35	80	D	25
Печь 380 кВт	$380 / (3 \cdot 0,38 \cdot 0,95) \approx 608$	ВА 57-41	630	D	30
Компрессор 37 кВт	$37 / (3 \cdot 0,38 \cdot 0,8) \approx 70$	ВА 57-35	80	D	25

Для групповых линий – автоматы с характеристикой «C» или «D» (для двигателей и сварки – «D»). Для освещения – автоматы характеристики «C» на ток 16–25 А.

Устройства защитного отключения (УЗО) – устанавливаются на розеточные группы и линии, питающие передвижное оборудование (дифференциальный ток 30 мА).

2.4 Расчёт освещения производственного цеха

2.4.1 Выбор источника света с учётом условий среды

Условия среды в цехе:

Наличие пыли (механическая обработка, абразивоструйная обработка).

Вибрация (работа прессов, компрессоров, транспортеров).

Нормальная температура, отсутствие химически агрессивных сред.

Выбор источника света:

Светодиодные светильники (LED) обладают высокой светоотдачей (120–150 лм/Вт), длительным сроком службы (50 000 ч), устойчивостью к вибрации и низким пульсациям. Для производственных помещений с пылью и вибрацией рекомендуется степень защиты IP65 (пыленепроницаемые, защита от струй воды). Тип светильника – подвесной промышленный, например:

LED-светильник «ТЕС LED Highbay» (мощность 150 Вт, световой поток 21 000 лм, IP65, рабочая температура -40...+50°C).

Или LED-светильник «Gauss Industrial» 200 Вт, 28 000 лм.

Для местного освещения на рабочих местах (станки, верстаки) – светодиодные светильники на гибком кронштейне IP54.

2.4.2 Расчёт освещённости методом коэффициента использования светового потока (для общего освещения) и точечным методом (для местного)

Таблица 10 - Исходные данные по помещению цеха

Параметр	Значение
Длина цеха (по горизонтали)	138 м
Ширина основной части	23,24 м (23240 мм)
Высота цеха (до ферм)	8,0 м
Расчётная высота подвеса светильников	$h=6,5$ м (светильники крепятся на тросах или кронштейнах ниже ферм)

Площадь производственного помещения (ориентировочно)	$\approx 3000 \text{ м}^2$ ($138 \times 23,24 = 3207 \text{ м}^2$ минус площадь бытовок и складов)
--	---

Нормируемая освещённость для механических и сборочных цехов согласно СП 52.13330.2016:

Общее освещение – 200 лк (разряд зрительной работы IV).

Местное освещение (сварочные посты, контрольно-измерительные операции) – 500 лк.

Расчёт методом коэффициента использования (общее освещение)

1. Индекс помещения:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{138 \cdot 23,24}{6,5 \cdot (138 + 23,24)} \approx 3,06$$

2. Коэффициенты отражения:

Потолок (бетонный, светлый) – 50%, стены (светлая краска) – 30%, пол (бетон, тёмный) – 10%. По таблицам для светильников типа Highbay (косинусная КСС – Д) коэффициент использования светового потока $\eta=0,65$.

3. Световой поток одного светильника:

Выбран светильник GaussIndustrial 200 Вт, $\Phi_{\text{л}}=28000$ лм.

4. Количество светильников для общего освещения:

$$N = \frac{E_{\text{н}} \cdot S \cdot k_3 z}{\Phi_{\text{л}} \cdot \eta}$$

где:

$E_{\text{н}}=200$ лк,

$S=3200$ м²,

$k_3=1,5$ (коэффициент запаса для запылённых помещений),

$z=1,15$ (коэффициент неравномерности),

$\eta=0,65$,

$\Phi_{\text{л}}=28000$ лм.

$$N = \frac{200 \cdot 3200 \cdot 1,5 \cdot 1,15}{2800 \cdot 0,65} \approx 60,7 \text{ шт}$$

Принимаем 64 светильника (для чётного расположения по рядам).

5. Размещение светильников:

Цех длиной 138 м, ширина 23,24 м. Рядов – 4 (по 16 светильников в ряду). Расстояние между рядами ≈ 6 м, между светильниками в ряду $\approx 8,6$ м. Расстояние от стен – 3–4 м. Такое размещение обеспечивает равномерность.

Точечный метод для местного освещения

Местное освещение организуется на каждом рабочем месте (станки, сварочные посты, сборочные столы). Используются светодиодные светильники с гибкой штангой мощностью 20–30 Вт (световой поток 2000–3000 лм). Нормируемая освещённость на рабочей поверхности – 500 лк. Устанавливается по одному светильнику на каждый станок (всего около 80 станков, но часть освещается общим светом). Принимаем 40 светильников местного освещения по 25 Вт.

2.4.3 Проектирование осветительной сети и выбор щитов освещения (ЩО)

Схема осветительной сети:

Питание – от отдельных секций РУ-0,4 кВ КТП (для независимости от пусков двигателей).

Устанавливается два щита освещения (ЩО1 и ЩО2) на каждую секцию.

Групповые линии – 16 групп на щит (автоматы 16 А, характеристика С).

Кабели – ВВГнг-LS (не распространяющий горение, низкое дымообразование) сечением $3 \times 1,5 \text{ мм}^2$ для освещения, $3 \times 2,5 \text{ мм}^2$ для розеток.

Расчёт мощности освещения:

Общее освещение: $64 \text{ светильника} \times 200 \text{ Вт} = 12,8 \text{ кВт}$.

Местное освещение: $40 \times 25 \text{ Вт} = 1,0 \text{ кВт}$.

Розетки и вспомогательное (аварийное освещение – 10% от общего) $\approx$ 1,5 кВт.

Итогоосветительная нагрузка $\sim$ 15,3 кВт.

Ток ($\text{при } \cos\varphi=0,95$)

$$I=15300/(1,73*380*0,95)\approx 24,5$$

$$I=15300/(1,73*380*0,95)\approx 24,5\text{А.}$$

Выбор щитов:

ЩО1 и ЩО2 – типа ЩРН-12 (12 модулей, степень защиты IP31). В каждом: вводной автомат 3Р 40 А, УЗО 30 мА, 8 групповых автоматов 1Р 16 А для освещения, 4 автомата 2Р 16 А для розеток.

Аварийное освещение (эвакуационное) – от аккумуляторных светильников или отдельной линии с АВР.

2.5. Выбор вводно-распределительных устройств (ВРУ, ГРЩ)

Функции ВРУ (вводно-распределительное устройство) на границе балансовой принадлежности выполняет РУ-0,4 кВ в составе КТП. Однако в соответствии с ПУЭ для цеха с большой нагрузкой рекомендуется дополнительное ГРЩ для распределения по радиальным линиям.

Принимаем ГРЩ-0,4 кВ типа «Kraft» или «ABB» на ток до 2000 А, с двумя секциями и АВР. Состав ГРЩ

Таблица 11 – Вводно-распределительные устройства

Позиция	Наименование	Кол-во	Параметры
1	Вводной автомат (секция 1)	1	ВА 57-41, 1000 А, 35 кА
2	Вводной автомат (секция 2)	1	ВА 57-41, 1000 А, 35 кА
3	Секционный автомат	1	ВА 57-41, 2000 А, 35 кА
4	УЗМ (устройство защиты от перенапряжений)	2	3-фазный, класс II, 40 кА
5	Автоматы отходящих линий (на ШР, РП)	12	ВА 57-35, 40...630 А,

			25...35 кА
6	УКРМ (конденсаторная установка)	1	100 квар, автоматическая
7	Счётчики электроэнергии	2	СЭТ-4ТМ.03М.01 (на каждый ввод)
8	Измерительные трансформаторы тока	6	Т-0,66, 1000/5, класс 0,5
9	Шинопровод (между секциями)	1	на 2000 А

2.5.2 Спецификация оборудования и материалов

На основании выполненных в разделах 2.1–2.5 расчётов электрических нагрузок, выбора мощности трансформаторов, схемы электроснабжения, сечений кабелей, аппаратов защиты и осветительного оборудования составляется итоговая спецификация. Данный документ является неотъемлемой частью проекта модернизации системы электроснабжения цеха и предназначен для:

- систематизации всех элементов электротехнического комплекса;
- оформления заказа на оборудование и материалы;
- контроля комплектности при монтажных работах;
- последующего обслуживания и ремонта.

Спецификация разработана в соответствии с требованиями ГОСТ 21.110-2013 «Система проектной документации для строительства. Спецификация оборудования, изделий и материалов» и ГОСТ 2.701-2008 «ЕСКД. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению».

Таблица 12 – Спецификация основного оборудования для системы электроснабжения цеха

№	Наименование	Тип / модель	Кол-во	Примечание
1	Трансформатор силовой масляный	ТСЛЗ-1250/6/0,4	2	существующий
2	Комплектная трансформаторная	КТП 2×1250 кВА, 6/0,4 кВ	1	в сборе (со всем РУ-0,4)

	подстанция			
3	ГРЩ (главный распределительный щит)	ЩО-70-2-2000А	1	на два ввода с АВР
4	Автоматический выключатель вводной	ВА 57-41, 1000 А	2	35 кА, 3-полюсный
5	Автоматический выключатель секционный	ВА 57-41, 2000 А	1	35 кА, 3-полюсный
6	Автоматический выключатель на ШР-1	ВА 57-35, 160 А	1	30 кА, характеристика D
7	Автоматический выключатель на ШР-2	ВА 57-35, 40 А	1	20 кА, характеристика C
8	Автоматический выключатель на ШР-3	ВА 57-35, 80 А	1	25 кА, характеристика D
9	Автоматический выключатель на печь ПП450	ВА 57-41, 630 А	1	30 кА, характеристика D
10	Установка компенсации реактивной мощности	УКРМ-0,4-100	1	автоматическая, 7 ступеней
11	Кабель силовой 6 кВ	АВБбШв-6 3×95	50 м	от ГПП до КТП
12	Кабель силовой 0,4 кВ (ШР-1)	АВВГ 3×95+1×50	80 м	4 линии
13	Кабель силовой 0,4 кВ (печи)	АВВГ 2×(3×185)+1×95	60 м	две нитки
14	Кабель управления и сигнализации	КВВГЭ 14×1,5	200 м	
15	Шкаф распределительный (ШР-1)	ШР-11-73500	1	6 отходящих автоматов
16	Шкаф распределительный (ШР-2)	ШР-11-73200	1	4 отходящих
17	Шкаф распределительный (ШР-3)	ШР-11-73300	1	4 отходящих
18	Щит освещения (ЩО1, ЩО2)	ЩРН-12	2	12 модулей, IP3

19	Светильник LED промышленный	GaussIndustrial 200 Вт	64	IP65, 28000 лм
20	Светильник местного освещения	LED 25 Вт на кронштейне	40	IP54
21	Заземляющее устройство	контур из стали 63×63×5	1 компл.	сопротивление ≤ 4 Ом
22	Шина заземления (ГЗШ)	медная 30×4	10 м	
23	Кабельные лотки	ЛК-200, ЛК-400	300 м	с перегородками

Вывод по главе 2

В результате практического проектирования системы электроснабжения цеха производства электрических машин:

На основе расчёта электрических нагрузок (полная мощность 1092 кВА, ток 1658 А) подтверждена достаточность существующих трансформаторов 2×1250 кВА. Коэффициент загрузки в нормальном режиме 0,44, в послеаварийном – 0,87, что соответствует II категории надёжности.

Выбрано место установки КТП в центре электрических нагрузок (согласно плану – в районе оси 15–16 между участками). Выполнен расчёт токов короткого замыкания (30 кА на шинах 0,4 кВ), что позволило корректно выбрать аппараты защиты.

Предложена компенсация реактивной мощности (УКРМ 100 квар) для повышения $\cos\varphi$ до 0,96.

Разработана радиально-магистральная схема внутрицеховой сети с разделением на силовые распределительные пункты (ШР-1 ... ШР-5) и отдельные линии для печей и компрессоров.

Рассчитано общее и местное освещение с применением энергоэффективных светодиодных светильников (64 шт. для общего, 40 – для местного). Осветительная сеть выполнена по двум независимым щитам освещения, что повышает надёжность.

Выбрано вводно-распределительное оборудование (ГРЩ на 2000 А, автоматические выключатели, кабели, шинопроводы) и составлена подробная спецификация.

Все проектные решения соответствуют требованиям ПУЭ, СП 31-110-2003, СП 76.13330.2016 и обеспечивают безопасную, надёжную и экономичную работу цеха.

3 ОХРАНА ТРУДА И ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ

3.1 Мероприятия по электробезопасности при эксплуатации спроектированной сети

Эксплуатация электроустановок напряжением до и выше 1000 В связана с повышенной опасностью поражения электрическим током, а также с риском возникновения пожаров и взрывов. В спроектированной системе электроснабжения цеха (КТП 2×1250 кВА, РУ-0,4 кВ, распределительные шкафы, кабельные линии) предусмотрен комплекс организационных и технических мероприятий, обеспечивающих электробезопасность персонала.

3.1.1 Расчет защитного заземления (контура заземления) и зануления

Цель расчёта – обеспечить сопротивление заземляющего устройства не более значений, требуемых ПУЭ (для установок до 1000 В с глухозаземлённой нейтралью – не более 4 Ом; для повторного заземления PEN-проводника – не более 10 Ом). Также проверяется условие срабатывания защиты при замыкании на корпус в системе TN-S.

Исходные данные для расчёта контура заземления КТП:

Удельное сопротивление грунта (суглинок, влажность средняя): $\rho = 100$ Ом·м.

Климатический коэффициент (для зоны с холодной зимой): $\psi = 1,5$.

Расчётное удельное сопротивление: $\rho_{\text{расч}} = \rho \cdot \psi = 150$ Ом·м.

Заземлитель – вертикальный электрод из угловой стали 63×63×5 мм, длина $L_{\text{в}} = 3$ м.

Горизонтальный электрод – стальная полоса 40×4 мм, заглубление $t = 0,7$ м.

Расстояние между вертикальными электродами (по предварительной оценке) $a = 5$ м.

Расчёт сопротивления одиночного вертикального электрода:

$$R_0 = \frac{\rho_{\text{расч}}}{2\pi L_B} \left(\ln \frac{2L_B}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t + L_B}{4t - L_B} \right)$$

Для уголка 63×63×5 мм эквивалентный диаметр $d = 0,95 \cdot b = 0,95 \cdot 0,063 = 0,06$ м. Глубина заложения середины электрода $t_0 = t + L_B/2 = 0,7 + 1,5 = 2,2$ м.

$$R_0 = \frac{150}{2\pi \cdot 3} \left(\ln \frac{2 \cdot 3}{0,06} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 2,2 + 3}{4 \cdot 2,2 - 3} \right) = 39,5 \text{ Ом}$$

Необходимое количество вертикальных электродов без учёта экранирования: $n = R_0 / R_{\text{норм}} = 39,5 / 4 \approx 10$ шт.

С учётом коэффициента использования $\eta_{\text{в}}$ (при $n=10$, $a/L=5/3 \approx 1,7$, $\eta_{\text{в}} \approx 0,6$):

$$n = \frac{R_0}{\eta_{\text{в}} \cdot R_{\text{норм}}} = \frac{39,5}{0,6 \cdot 4} = 16,5 \text{ шт}$$

Принимаем 18 вертикальных электродов.

Сопротивление горизонтальной полосы (соединительной):

Длина полосы $L_{\text{г}} = 1,05 \cdot a \cdot n = 1,05 \cdot 5 \cdot 18 = 94,5$ м.

$$R_r = \frac{p_{\text{расч}}}{2\pi L r} \ln \frac{2L_r^2}{b \cdot t}$$

где b – ширина полосы, 0,04 м; t – заглубление, 0,7 м.

$$R_r = \frac{150}{2\pi \cdot 94,5} \ln \frac{2 \cdot 95,5^2}{0,04 \cdot 0,7} = 3,38 \text{ Ом}$$

Общее сопротивление заземляющего устройства:

Коэффициент использования горизонтальной полосы при $n=18$, $a/L \approx 1,7$, $\eta_{\text{г}} \approx 0,3$.

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_0 \cdot R_r}{R_0 \cdot \eta_{\text{г}} + R_r \cdot \eta_{\text{в}} \cdot n} = \frac{39,5 \cdot 3,38}{39,5 \cdot 0,3 + 3,38 \cdot 0,6 \cdot 18} = 2,76 \text{ Ом}$$

Полученное сопротивление (2,76 Ом) меньше 4 Ом, что соответствует требованиям ПУЭ.

Зануление выполнено в системе TN-S: нейтраль трансформатора глухо заземлена, к ней подключены PEN-проводники, которые затем разделяются на PE и N. Внутрицеховые сети используют пятижильные кабели (3 фазы + N + PE). При замыкании фазы на корпус ток однофазного короткого замыкания

отключает автоматический выключатель за время, меньшее допустимого (по условию безопасности). Проверка: для линии ШР-1 (кабель 95 мм², длина 40 м) ток КЗ на корпусе ~ 1,5 кА, что значительно превышает уставку автомата 160 А (кратность >9), поэтому защита сработает мгновенно.

3.1.2 Организация безопасного обслуживания электроустановок

Эксплуатация спроектированной системы электроснабжения осуществляется в соответствии с Правилами по охране труда при эксплуатации электроустановок и ПУЭ.

Основные организационные мероприятия:

Назначение ответственных лиц – главный энергетик, ответственный за электрохозяйство цеха, оперативный персонал.

Оперативное обслуживание – ведение оперативных переключений (включение/отключение вводных автоматов, секционного выключателя, АВР) только по распоряжению или наряду-допуску.

Наряд-допуск – оформляется на работы в действующих электроустановках напряжением выше 1000 В (в КТП со стороны 6 кВ) и на работы с полным снятием напряжения в РУ-0,4 кВ. В наряде определяются состав бригады, меры безопасности (установка заземлений, вывешивание плакатов, ограждение).

Периодическая проверка сопротивления изоляции кабелей, обмоток трансформаторов, цепей управления – не реже 1 раза в 3 года.

Проверка срабатывания устройств защитного отключения (УЗО) – ежемесячно кнопкой «Тест».

Маркировка и надписи – все аппараты, щиты, кабели имеют четкие обозначения (согласно однолинейной схеме).

Плакаты и знаки безопасности:

«Не включать – работают люди» (на приводах выключателей).

«Опасно – электрическое напряжение» (на дверцах КТП, ГРЩ).

Заземляющие ножи и переносные заземления.

Средства индивидуальной защиты (СИЗ):

диэлектрические перчатки, боты, коврики;

указатели напряжения (до и выше 1000 В);

изолирующие штанги, инструмент с изолированными рукоятками.

Допуск персонала – группа по электробезопасности не ниже III для оперативного обслуживания РУ-0,4 кВ, не ниже IV для работ в КТП-6 кВ.

3.2 Производственная санитария и гигиена труда

3.2.1 Анализ вредных факторов производства

В цехе производства электрических машин на работающих воздействуют следующие вредные и опасные факторы:

Таблица 13 – вредных и опасных факторов

Фактор	Источники	Нормативный документ	Допустимые уровни
Повышенное напряжение в электрической цепи	Все электрооборудование, КТП, кабели	ПУЭ, ГОСТ 12.1.038-82	Прикосновение под напряжением недопустимо
Повышенный уровень шума	Компрессоры, прессы, вентиляция, трансформаторы	СН 2.2.4/2.1.8.562-96	80 дБА (предел 85)
Вибрация	Прессы, компрессоры, станки ударного действия	ГОСТ 12.1.012-2004	92 дБ (для локальной вибрации)
Запылённость воздуха	Механическая обработка металла, абразивоструйная камера	ГН 2.2.5.3532-18	ПДК пыли 4 мг/м ³ (нефиброгенная)
Химические вещества	Сварочные аэрозоли (MnO ₂ , оксиды азота), пары лакокрасочных материалов, пропиточные составы	ГН 2.2.5.3532-18	ПДК: марганец 0,2 мг/м ³ , NO ₂ 2 мг/м ³

Недостаточная освещённость	Зоны с местным освещением (станки, сварочные посты)	СП 52.13330.2016	200 лк общее, 500 лк местное
Микроклимат	Нагретый воздух от печей, отсутствие кондиционирования на участках	СанПиН 1.2.3685-21	температура 17–22 °С (для лёгкой работы)
Электромагнитные поля	Вакуумные выключатели, кабельные линии 6 кВ	СанПиН 1.2.3685-21	ПДУ 5 кВ/м (50 Гц)

3.2.2 Обеспечение микроклимата и вентиляции в зонах пропитки и литья

Согласно технологическому процессу, в цехе имеются участки пропитки обмоток (изоляционно-намоточный участок) и литья (возможно, заливка компаундом). Эти зоны характеризуются выделением вредных паров растворителей, эпоксидных смол, а также повышенной температурой.

Требования к микроклимату (для работ средней тяжести):

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость воздуха, м/с
Холодный	17–23	40–60	$\leq 0,3$
Тёплый	18–27	40–60	$\leq 0,5$

Система вентиляции:

Механическая приточно-вытяжная вентиляция с локализирующими отсосами от пропиточных ванн и сушильных шкафов. Производительность рассчитывается по количеству выделяемых вредных веществ.

Местная вытяжка – зонты над ваннами пропитки, бортовые отсосы, вытяжные шкафы для сушки.

Аварийная вентиляция – при повышении концентрации паров выше ПДК (автоматическое включение от газоанализаторов).

Воздушное душирование рабочих мест у печей и литейных форм для снижения теплового облучения.

Контроль параметров микроклимата – стационарные датчики температуры и влажности, периодические замеры (не реже 2 раз в год). При отклонениях – регулирование расхода приточного воздуха, установка кондиционеров в помещениях с постоянным пребыванием персонала.

Вывод по разделу

Разработанные в дипломном проекте решения по модернизации системы электроснабжения цеха производства электрических машин ООО «Электромашсервис» полностью учитывают требования промышленной экологии и охраны труда.

Выполнен расчёт защитного заземления КТП, обеспечивающий сопротивление 2,76 Ом (менее 4 Ом по ПУЭ). Система зануления TN-S гарантирует быстрое отключение повреждённого оборудования.

Организовано безопасное обслуживание электроустановок с применением нарядов-допусков, СИЗ и плакатов.

Проведён анализ вредных производственных факторов; предложены меры по нормализации микроклимата и вентиляции в зонах пропитки и литья.

Внедрение LED-освещения снижает энергопотребление и исключает использование ртути, а утилизация ртутьсодержащих ламп организована по лицензионной схеме.

Все отходы производства (масла, ветошь, ЛКМ) собираются отдельно и передаются на утилизацию специализированным организациям.

Дополнительные экологические мероприятия (компенсация реактивной мощности, шумоглушение, контроль ЭМП) снижают негативное воздействие на окружающую среду.

Таким образом, спроектированная система электроснабжения является безопасной для персонала и экологичной, соответствует требованиям действующих нормативных документов (ПУЭ, СанПиН, ГОСТ, Федеральные законы № 384-ФЗ, № 123-ФЗ).

4 ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Любое техническое решение в области электроснабжения требует обоснования не только с точки зрения надёжности и безопасности, но и с экономической позиции. Внедрение модернизированной системы сопряжено с капитальными затратами на приобретение оборудования, монтаж и пусконаладку, однако позволяет снизить эксплуатационные издержки, уменьшить потери электроэнергии и предотвратить убытки от аварийных простоев производства.

В настоящем разделе выполняется технико-экономическое обоснование проекта модернизации системы электроснабжения цеха производства электрических машин ООО «Электромашсервис». Расчёт базируется на сопоставлении базового варианта (существующая система) и проектного варианта (с установкой ГРЩ, УКРМ, новых кабелей, светодиодного освещения и модернизацией аппаратов защиты).

4.1 Исходные данные для расчёта

Для корректного расчёта экономической эффективности необходимо предварительно определить основные параметры электропотребления цеха, тарифы на электроэнергию и объёмы инвестиций. Эти данные получены в результате ранее выполненных расчётов электрических нагрузок (раздел 2.1) и выбора оборудования (разделы 2.2–2.5).

Таблица 14 – Исходные данные

Параметр	Значение	Примечание
Суммарная активная нагрузка цеха P_p	1017 кВт	из табл. 5, Код=0,9
Полная мощность S_p	1092 кВА	—
Годовое потребление электроэнергии $W_{\text{год}}$	$1017 \times 4000 = 4\,068\,000$ кВт·ч	при двухсменной работе (4000 ч/год)
Тариф на электроэнергию $T_{\text{э}}$	6,20 руб./кВт·ч	для промышленных потребителей Пермского края (2025 г.)

Коэффициент мощности $\cos\varphi$ исходный	0,931	до компенсации
Коэффициент мощности после компенсации	0,96	после установки УКРМ 100 квар

4.2 Капитальные вложения (КВ)

Капитальные вложения представляют собой сумму всех затрат, необходимых для реализации проекта модернизации системы электроснабжения. От правильности их определения зависит достоверность последующих расчётов экономической эффективности (срока окупаемости, NPV, ROI). В состав капитальных затрат включаются:

- стоимость проектных работ (разработка рабочей документации, согласование);
- стоимость закупаемого электрооборудования (распределительные щиты, аппараты защиты, конденсаторная установка, светильники);
- стоимость кабельно-проводниковой продукции, кабельных лотков, элементов заземления и осветительной сети;
- затраты на электромонтажные и пусконаладочные работы;
- непредвиденные расходы (резерв на случай изменения цен или объёмов работ).

При формировании перечня оборудования использована спецификация, разработанная в подразделе 2.5.2. Стоимостные показатели приняты по данным поставщиков на I квартал 2026 года с учётом транспортно-заготовительных расходов. Существующие трансформаторы ТСЛЗ-1250/6/0,4 кВ, а также часть кабельных линий, находящихся в удовлетворительном состоянии, остаются в эксплуатации и не включаются в расчёт дополнительных капиталовложений.

Таблица 15 –Расчёт капитальных затрат.

№	Статья затрат	Стоимость, тыс. руб.	Обоснование
1	Трансформаторы (2×1250 кВА)	2400	существующие (в расчёт не включаются)
2	ГРЩ (главный распределительный щит)	350	ЩО-70-2-2000А
3	Распределительные шкафы ШР-1, ШР-2, ШР-3	180	3 шт. по 60 тыс.
4	Автоматические выключатели (вводные, секционный, отходящие линии)	280	по прайс-листу
5	УКРМ-0,4-100 (конденсаторная установка)	250	автоматическая, 7 ступеней
6	Кабельная продукция (6 кВ и 0,4 кВ)	620	АВБбШв-6, АВВГ, КВВГЭ
7	Кабельные лотки, заземление	180	ЛК-200, ЛК-400, сталь
8	Светодиодные светильники (64+40)	320	Gauss Industrial 200 Вт, LED 25 Вт
9	Щиты освещения ЩРН-12 (2 шт.)	40	
	Итого п.п. 2-9	2220	
10	Проектные работы (10% от суммы)	222	2200×0,1
11	Монтажные и пусконаладочные работы (20% от суммы)	444	2220×0,2
	Итого:	2886	
12	Непредвиденные расходы (5% от итога)	144	2886×0,05
	Итого капитальных вложений	3030	

4.3.1 Амортизационные отчисления

Амортизационные отчисления рассчитываются по формуле:

$$A = \frac{K * Na}{100\%}$$

Где К- капитальные затраты (стоимость амортизируемого оборудования), тыс. руб.

На- норма амортизации, (для электротехнического оборудования – На=5%).(Срок службы 20 лет).

$$A = 3030 \cdot 5/100 = 151,5 \text{ тыс. руб./год}$$

4.3.2 Затраты на техническое обслуживание и ремонт

Норма на ТО и ремонт – Нто=2% от капитальных вложений.

$$И_{то} = KB \cdot 0,02$$

$$И_{то} = 3030 \cdot 0,02 = 60,6 \text{ тыс. руб./год}$$

4.3.3 Стоимость потерь электроэнергии до и после модернизации

Потери в трансформаторах (2×1250 кВА, загрузка Кз=0,44):

Потери холостого хода (по паспорту) Рхх=2,5 кВт (на один трансформатор)

$$W_{хх} = 2 \cdot P_{хх} \cdot T_{год}$$

$$W_{хх} = 2 \cdot 2,5 \cdot 4000 = 20000 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Потери короткого замыкания Ркз=11 кВт (на один),

$$W_{кз} = 2 \cdot P_{кз} \cdot K_{з2} \cdot T_{год}$$

$$W_{кз} = 2 \cdot 11 \cdot (0,44)^2 \cdot 4000 = 22 \cdot 0,1936 \cdot 4000 = 17036,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Суммарные потери в трансформаторах:

$$W_{тр} = W_{хх} + W_{кз}$$

$$W_{тр} = 20000 + 17037 = 37037 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Потери в кабельных линиях (0,4 кВт) – предварительная оценка

$$\Delta W_{каб} \approx 0,025 \cdot W_{год}$$

$$\Delta W_{каб} = 0,025 \cdot 4068000 = 101700 \text{ кВт} \cdot \text{ч (при среднем сечении).}$$

Общие потери в системе до модернизации (cosφ=0,931):

$$W_{пот1} = W_{тр} + W_{каб}$$

$$W_{пот1} = 37037 + 101700 = 138737 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

После установки УКРМ ($\cos\varphi=0,96$) ток снижается в $\frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2} = \frac{0,931}{0,96} \approx 0,97$ раза, потери в кабелях – пропорционально квадрату тока:

$$W_{\text{каб2}} = W_{\text{каб}} \cdot \left(\frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2} \right)^2$$

$$W_{\text{каб2}} = 101700 \cdot (0,97)^2 = 95598 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Потери в трансформаторах изменяются незначительно (за счёт снижения реактивной составляющей), оценим снижение на 1%:

$$W_{\text{тр2}} = W_{\text{тр}} \cdot 0,99$$

$$W_{\text{тр2}} = 37037 \cdot 0,99 = 36666 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Общие потери после модернизации:

$$W_{\text{пот2}} = W_{\text{тр2}} + W_{\text{каб2}}$$

$$W_{\text{пот2}} = 36666 + 95598 = 132264 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Стоимость потерь при тарифе $T_{\text{э}} = 6,20$ руб./кВт·ч:

$$C_{\text{пот1}} = W_{\text{пот1}} \cdot T_{\text{э}}$$

$$C_{\text{пот2}} = W_{\text{пот2}} \cdot T_{\text{э}}$$

$$C_{\text{пот1}} = 138737 \cdot 6,20 = 860,2 \text{ тыс. руб./год} \quad C_{\text{пот2}} = 132264 \cdot 6,20 = 820,0 \text{ тыс. руб./год}$$

Экономия на потерях:

$$\Delta C_{\text{пот}} = C_{\text{пот1}} - C_{\text{пот2}} = 860,2 - 820,0 = 40,2 \text{ тыс. руб./год}$$

4.3.4 Снижение полезного потребления за счёт модернизации освещения

Потребление энергии на освещение:

До модернизации (лампы ДРЛ, люминесцентные): $P_{\text{осв1}} = 35,0$ кВт

$$W_{\text{осв1}} = P_{\text{осв1}} \cdot T_{\text{год}} = 35,0 \cdot 4000 = 140000 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год}$$

После модернизации (светодиодные): $P_{\text{осв2}} = 15,3$ кВт

$$W_{\text{осв2}} = 15,3 \cdot 4000 = 61200 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год}$$

Экономия электроэнергии на освещении:

$$\Delta W_{\text{осв}} = W_{\text{осв1}} - W_{\text{осв2}} = 140000 - 61200 = 78800 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год}$$

Стоимостная экономия:

$$\Delta C_{\text{осв}} = \Delta W_{\text{осв}} \cdot T_{\text{э}} = 78800 \cdot 6,20 = 488,56 \text{ тыс. руб./год}$$

4.3.5 Итоговые эксплуатационные расходы

После модернизации общие затраты (с учётом оплаты полезной энергии и потерь):

Полезное потребление после модернизации:

$$W_{\text{пол2}} = W_{\text{сил}} + W_{\text{осв2}} = 4068000 + 61200 = 4129200 \text{ кВт·ч/год}$$

Стоимость полезной энергии после модернизации:

$$C_{\text{пол2}} = W_{\text{пол2}} \cdot T_{\text{э}} = 4129200 \cdot 6,20 = 25601,0 \text{ тыс. руб./год}$$

До модернизации полезное потребление:

$$W_{\text{пол1}} = W_{\text{сил}} + W_{\text{осв1}} = 4068000 + 140000 = 4208000 \text{ кВт·ч/год}$$

$$C_{\text{пол1}} = 4208000 \cdot 6,20 = 26089,6 \text{ тыс. руб./год}$$

Полные затраты на электроэнергию (полезная + потери):

До модернизации:

$$\text{Э1} = C_{\text{пол1}} + C_{\text{пот1}} = 26089,6 + 860,2 = 26949,8 \text{ тыс. руб./год}$$

После модернизации:

$$\text{Э2} = C_{\text{пол2}} + C_{\text{пот2}} = 25601,0 + 820,0 = 26421,0 \text{ тыс. руб./год}$$

Экономия на электроэнергии (полезная + потери):

$$\Delta \text{Э} = \text{Э1} - \text{Э2} = 26949,8 - 26421,0 = 528,8 \text{ тыс. руб./год}$$

Эксплуатационные расходы без учёта ущерба:

До модернизации (амортизация отсутствует, ТО + электроэнергия):

$$\text{И1} = \text{Ито} \cdot 1,1 + \text{Э1} = 60,6 \cdot 1,1 + 26949,8 = 66,66 + 26949,8 = 27016,46 \text{ тыс.руб./год}$$

После модернизации (с амортизацией):

$$\text{И2} = \text{А} + \text{Ито} + \text{Э2} = 151,5 + 60,6 + 26421,0 = 26633,1 \text{ тыс. руб./год}$$

4.4 Предотвращённый ущерб от аварий и простоев

Ущерб от недоотпуска электроэнергии:

$$Y = t_{\text{ав}} \cdot P_{\text{ав}} \cdot B$$

где $t_{\text{ав}}$ – среднегодовое время аварийного простоя, ч; $P_{\text{ав}} = 500 \text{ кВт}$ – средняя отключаемая мощность; $B = 50 \text{ руб./кВт·ч}$ – удельный ущерб.

До модернизации ($t_1 = 8 \text{ ч/год}$):

$$Y_1 = 8 \cdot 500 \cdot 50 = 200 \text{ тыс. руб./год}$$

После модернизации ($t_2=2t_1=2$ ч/год):

$$Y_2=2 \cdot 500 \cdot 50=50 \text{ тыс. руб./год}$$

Предотвращённый ущерб:

$$\Delta Y=200-50=150 \text{ тыс. руб./год}$$

4.5 Годовой экономический эффект

Общие годовые затраты (эксплуатационные + ущерб):

$$Z_1=I_1+Y_1=27016,46+200=27216,46 \text{ тыс. руб./год}$$

$$Z_2=I_2+Y_2=26633,1+50=26683,1 \text{ тыс. руб./год}$$

Годовая экономия:

$$\Delta Z=Z_1-Z_2=27216,46-26683,1=533,36 \text{ тыс. руб./год}$$

Эта экономия складывается из:

снижения затрат на полезную электроэнергию (освещение) – 488,56 тыс. руб./год,

снижения потерь в сетях – 40,2 тыс. руб./год,

снижения ущерба от простоев – 150 тыс. руб./год,

минус рост затрат на амортизацию и ТО нового оборудования: $(151,5+60,6)-66,66=145,44$ тыс.руб./год.

Итого: $488,56+40,2+150-145,44=533,32$ тыс. руб./год

4.6 Показатели экономической эффективности

4.6.1 Простой срок окупаемости

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{\Delta I_{\text{год}}} = \frac{3030}{553,36} \approx 5,68 \text{ лет}$$

Таблица 16 – Итоговые экономические показатели

Показатель	Формула	До модернизации	После модернизации	Изменение
Полезное потребление, тыс. кВт·ч/год	$W_{\text{пол}}=W_{\text{сил}}+W_{\text{осв}}$	4208	4129,2	-78,8
Затраты на электроэнергию (полезная+потери),	$\Sigma=С_{\text{пол}}+С_{\text{пот}}$	26 949,8	26 421,0	-528,8

тыс. руб./год				
Эксплуатационные расходы (с амортизацией), тыс. руб./год	$I=A+I_{то}+Э$	27 016,5	26 633,1	-383,4
Ущерб от простоев, тыс. руб./год	$У=тавPавВ$	200	50	-150
Общие годовые затраты, тыс. руб./год	$З=И+У$	27 216,5	26 683,1	-533,4
Капитальные вложения, тыс. руб.	KB	—	3030	—
Простой срок окупаемости, лет	$Ток=KB/ΔЗ$	—	5,68	—

Вывод по разделу 4:

Модернизация системы электроснабжения цеха, включая замену освещения на светодиодное, установку УКРМ и замену коммутационной аппаратуры, требует дополнительных капитальных вложений 3 030 тыс. руб. Годовая экономия составит 533,4 тыс. руб. за счёт снижения потребления электроэнергии на освещение (488,6 тыс. руб.), уменьшения потерь (40,2 тыс. руб.) и предотвращения ущерба от аварий (150 тыс. руб.) при частичном нивелировании ростом амортизации и затрат на ТО. Срок окупаемости – 5,7 лет

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения дипломной работы разработан проект модернизации системы электроснабжения цеха производства электрических машин ООО «Электромашсервис» (г. Лысьва, Пермский край). На основе анализа существующей инфраструктуры, технологических процессов и нормативных требований предложены технические решения, обеспечивающие надёжное, безопасное и экономически эффективное электроснабжение производственного цеха.

Основные результаты работы:

Анализ текущего состояния показал, что существующая система электроснабжения в целом функциональна, но имеет «узкие места»: недостаточную селективность защит, концентрацию нагрузок в одной точке, устаревшую элементную базу (ретрофит ячеек 6 кВ), неоптимальную организацию кабельных трасс и отсутствие глубокого разделения силовых и осветительных сетей.

Расчёт электрических нагрузок (методом коэффициента расчётной нагрузки) выявил суммарную активную мощность цеха 1017 кВт, полную мощность 1092 кВА, расчётный ток 1658 А. Определён центр электрических нагрузок ($X=90,2$ м, $Y=12,5$ м), в соответствии с которым подтверждено оптимальное размещение цеховой трансформаторной подстанции в районе осей 15–16 / В–Г.

Выбор основного оборудования: существующие два трансформатора ТСЛЗ-1250/6/0,4 кВ обеспечивают требуемую II категорию надёжности: коэффициент загрузки в нормальном режиме 0,44, в послеаварийном – 0,87, что допустимо по ГОСТ 14209-85. Предложена компенсация реактивной мощности (УКРМ-0,4-100 квар) для повышения $\cos\phi$ с 0,931 до 0,96, что снижает потери в кабельных линиях.

Проектирование внутрицеховой сети выполнено по радиально-магистральной схеме с разделением на распределительные шкафы (ШР-1 ... ШР-5) и отдельные радиальные линии для мощных потребителей (печи,

компрессоры). Выполнен расчёт токов короткого замыкания (29,4 кА на шинах 0,4 кВ), выбраны сечения проводников (кабели АВВГ сечением до 95 мм², шинопровод на 2000 А) и аппараты защиты (автоматические выключатели ВА 57-41, ВА 57-35 с соответствующими характеристиками C/D). Обеспечена селективность защит.

Осветительная установка спроектирована с использованием энергоэффективных светодиодных светильников (64 шт. для общего освещения мощностью 200 Вт каждый, 40 шт. для местного освещения по 25 Вт). Методом коэффициента использования светового потока рассчитана освещённость 200 лк (общее) и 500 лк (местное), что соответствует нормам СП 52.13330.2016. Схема подключения осветительных щитов (ЩО1 и ЩО2) к независимым секциям КТП исключает мерцание света при пусках двигателей.

Электробезопасность и охрана труда: выполнен расчёт защитного заземления – сопротивление контура 2,76 Ом (менее 4 Ом по ПУЭ). Принята система заземления TN-S с разделением PEN-проводника на PE и N. Предусмотрены организационные мероприятия (наряд-допуск, оперативное обслуживание, применение СИЗ) и технические решения (УЗО, маркировка, плакаты). Проведён анализ вредных факторов (шум, вибрация, запылённость, химические вещества, микроклимат) и предложены меры по их снижению – местная вытяжная вентиляция в зонах пропитки и сварки, воздушное душирование у печей, контроль параметров среды.

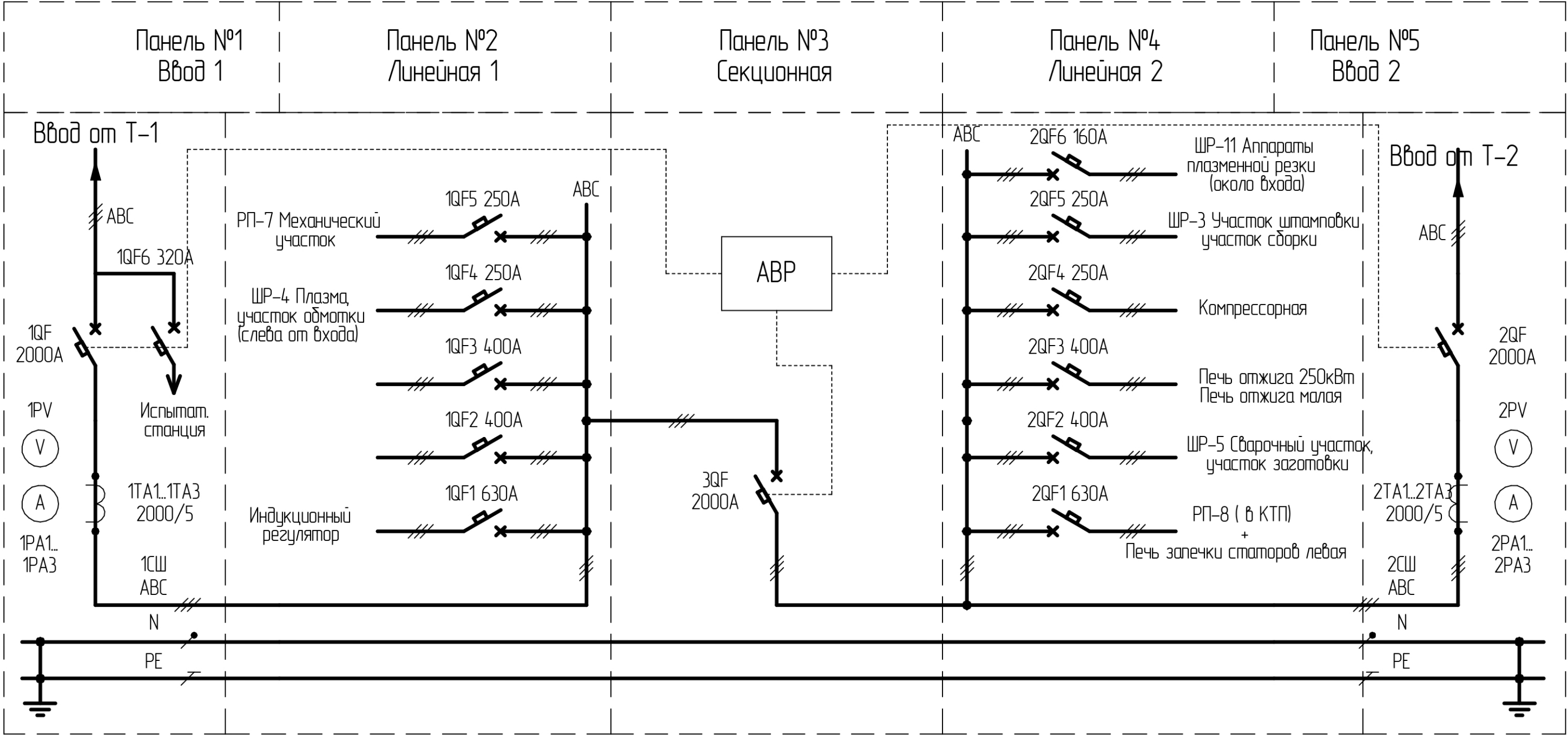
Экономическая эффективность: капитальные вложения на модернизацию (ГРЩ, УКРМ, автоматические выключатели, кабели, светодиодные светильники, монтажные работы) составляют 3 030 тыс. руб. Годовая экономия от реализации проекта равна 533,4 тыс. руб., в том числе за счёт снижения расхода электроэнергии на освещение (488,6 тыс. руб.), уменьшения потерь в сетях (40,2 тыс. руб.) и предотвращения ущерба от аварийных простоев (150 тыс. руб.). Простой срок окупаемости инвестиций – 5,7 лет, что является приемлемым для промышленных предприятий.

Итоговый вывод: разработанный проект модернизации системы электроснабжения цеха производства электрических машин ООО «Электромашсервис» соответствует требованиям действующих нормативных документов (ПУЭ, СП 31-110-2003, СП 76.13330.2016, ГОСТы), обеспечивает бесперебойное электроснабжение потребителей II категории надёжности, безопасность персонала и экологическую безопасность, а также является экономически обоснованным. Рекомендуется к внедрению в полном объёме.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

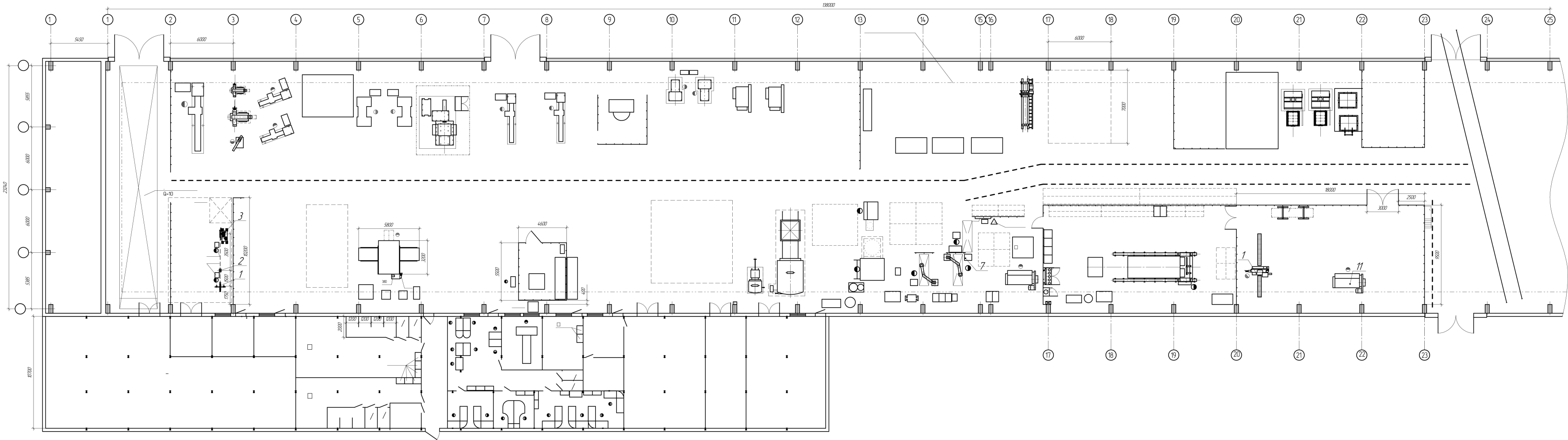
1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е издание. – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2023. – 512 с.
2. СП 31-110-2003. Проектирование и монтаж электроустановок жилых и общественных зданий. – М.: Госстрой России, 2004.
3. СП 76.13330.2016 (актуализированная редакция СНиП 3.05.06-85). Электротехнические устройства. – М.: Минстрой России, 2016.
4. СП 52.13330.2016 (актуализированная редакция СНиП 23-05-95). Естественное и искусственное освещение. – М.: Минстрой России, 2016.
5. ГОСТ Р 50571.5.52-2011 / МЭК 60364-5-52:2009. Электроустановки низковольтные. Часть 5-52. Выбор и монтаж электрооборудования. Электропроводки. – М.: Стандартинформ, 2012.
6. Федеральный закон № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» (ред. от 02.07.2013).
7. Федеральный закон № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (ред. от 29.07.2017).
8. ГОСТ 14209-85 (МЭК 354-80). Трансформаторы силовые масляные. Допустимые нагрузки. – М.: Издательство стандартов, 1985.
9. ГОСТ 12.1.038-82. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов. – М.: Издательство стандартов, 1983.
10. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» – М.: Роспотребнадзор, 2021.
11. ГОСТ 21.110-2013. Система проектной документации для строительства. Спецификация оборудования, изделий и материалов. – М.: Стандартинформ, 2014.
12. Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов: учебное пособие для среднего профессионального образования. – М.: Издательский центр «Академия», 2019. – 320 с.

13. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение промышленных предприятий и установок: учебник. – М.: Форум: ИНФРА-М, 2020. – 368 с.
14. Щербаков Е.Ф., Александров Д.С., Дубов А.А. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях: учебное пособие. – М.: Форум: ИНФРА-М, 2018. – 304 с.
15. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок (утв. Приказом Минтруда России от 15.12.2020 № 903н). – М.: ЭНАС, 2021.
16. Методические рекомендации по расчёту и выбору устройств компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий / ВНИИЭ, 2019.
17. Справочник по проектированию электроснабжения / под ред. Ю.Г. Барыбина. – М.: Энергоатомиздат, 2019. – 576 с.
18. Типовой альбом А11-2011 «Прокладка кабелей напряжением до 35 кВ в траншеях с применением двустенных гофрированных труб» – М.: Энергопроект, 2011.



					ДР 13.02.07 ЭС9-22-1сп0 93 1			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Схема силовая однолинейная РЧ-0,4кВ КТП ООО Электромашсервис	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.	Азмуков Н.Р.					У		
Пров.	Торошин А.К.					Лист	Листов 1	
Т.контр.						ЛФ ПНИПУ		
Н.контр.								
Утв.								

ДР 13.02.07 ЭС9-22-1сп0 93 2



					ДР 13.02.07 ЭС9-22-1сп0 93 2				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Схема расположения электрооборудования ООО Электромашсервис	Лит.	Масса	Масштаб	
Разраб.	Азмиков Н.Р.					У			
Пров.	Торошин А.К.					Лист			
Т.контр.						Листов 1			
Н.контр.						ЛФ ПНИПУ			
Утв.									
					Копировал			Формат А2	