

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

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.03.02. Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электроснабжение

(направленность (профиль)/специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Электроснабжение группы цехов трубопрокатного завода

Обучающийся

М.Ю. Каменев

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

О.В. Федяй

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

Тольятти 2025

Аннотация

Актуальность темы работы состоит в необходимости обеспечения группы цехов планируемого к постройке предприятия – трубопрокатного завода стабильным и качественным питанием электрической энергией. Без этого данный завод невозможно ввести в эксплуатацию и наладить производство трубопрокатной продукции.

Содержание ВКР включает в себя вопросы: характеристика предприятия, исходные данные для разработки системы электроснабжения; определение электрических нагрузок; картограмма нагрузок, выбор места расположения ГПП; выбор силовых трансформаторов; расчет схемы внутризаводского электроснабжения, выбор марок кабелей; определение токов короткого замыкания; выбор оборудования электрической части ГПП; выбор оборудования электрической сети ремонтно-механического цеха.

Выпускная квалификационная работа содержит 55 страниц, 8 рисунков, 15 таблиц, 20 источников.

Содержание

Введение	4
1 Характеристика предприятия, исходные данные для разработки системы электроснабжения	7
1.1 Характеристика предприятия	7
1.2 Исходные данные на проектирование	8
2 Разработка системы электроснабжения группы цехов трубопрокатного завода	14
2.1 Определение электрических нагрузок	14
2.2 Картограмма нагрузок, выбор места расположения ГПП	19
2.3 Выбор силовых трансформаторов цеховых ТП	23
2.4 Выбор силовых трансформаторов ГПП	29
2.5 Расчет схемы внутризаводского электроснабжения, выбор марок кабелей	34
2.6 Определение токов короткого замыкания	38
2.7 Выбор оборудования электрической части ГПП	43
2.8 Выбор оборудования электрической сети ремонтно-механического цеха	47
Заключение	53
Список используемых источников	54

Введение

В современном мире трубы играют ключевую роль в обеспечении транспортировки жидкостей и газов, а также в строительстве и энергетике. Производство трубопроката объединяет в себе сложный технологический процесс, высокий уровень автоматизации и строгое соблюдение стандартов качества, что позволяет создавать продукцию, способную выдерживать большие нагрузки и работать в экстремальных условиях. Используя различные сплавы, можно получить продукцию с требуемыми свойствами. Одним из основных этапов в производстве трубопроката является выбор исходного сырья. Чаще всего это сталь, которая обладает необходимыми механическими свойствами и стойкостью к коррозии. Применяя современные марки сталей, возможно получить высококачественную продукцию, например, для постройки магистральных трубопроводов. Качество материала определяется стандартами, что гарантирует долговечность и надежность труб. Важно отметить, что помимо стали, в производстве могут применяться и сплавы, обеспечивающие специальные характеристики изделия в зависимости от области применения. Используя специальные легирующие добавки, можно изменять механические и химические показатели сплавов. Основной технологический процесс включает несколько последовательных этапов. Первоначально стальной заготовке придают нужную форму с помощью прокатных станов, где материал подвергается множественному давлению и деформации. Регулируя процесс, можно задавать требуемые параметры формы изделий. В процессе прокатки сталь равномерно распределяется, что способствует увеличению её прочности. Современные прокатные линии оснащены автоматизированными системами контроля качества продукции.

Ключевые технологические процессы изготовления трубопрокатной продукции проводятся в производственных цехах, как правило, объединенных в группы по специализации изготовления отдельных

элементов конструкции труб и трубопроводов или их сборке, комплектации и испытаниям. Вместе со вспомогательными производственными участками (ПУ), такими как, например, склады, хранилища, административно-бытовые корпуса (АБК), лаборатории, котельные, насосные, компрессорные, испытательные цеха и т.д., обеспечивающими вспомогательные технологические процессы на данном промышленном объекте, группы основных производственных цехов образуют цельное крупное предприятие – трубопрокатный завод. Данное предприятие представляет собой огороженную металлическим или железобетонным забором территорию, на которой расположены все производственные участки. Питание ПУ со значительными суммарными электрическими нагрузками (ввиду наличия большого числа энергоемких промышленных электроприемников) выполняется от собственных трансформаторных подстанций (ТП) класса напряжения 10 (6)/0,4 кВ. В случае наличия на участке только высоковольтной нагрузки (например, дуговых сталеплавильных печей или мощных высоковольтных электродвигателей), на производственном участке устанавливается отдельное распределительное устройство (РУ) класса напряжения 10 (6) кВ. Если же общая нагрузка электроприемников ПУ относительно невелика, то участок целесообразно питать электрической энергией от наиболее близко расположенной ТП соседнего здания.

Производство современной высококачественной трубопрокатной продукции – это сложный и многогранный процесс, который требует сочетания инженерного мастерства, современных технологий и строгого контроля качества. После формирования трубы проводятся операции, связанные с термической обработкой и проверкой качества. Производя дополнительную обработку продукции, можно существенно улучшить ее механические и иные параметры. Термическая обработка требуется для устранения внутренних напряжений в материале и достижения оптимальных физико-механических свойств. Затем труба проходит через систему неразрушающего контроля, где с помощью современных методов, таких как

ультразвуковой или рентгеновский контроль, проверяется отсутствие внутренних дефектов, таких как трещины или поры. Применяя современное контрольно-диагностическое оборудование, возможно практически исключить брак конечной продукции.

Основная часть технологических операций по производству на современных предприятиях выполняются энергоемким промышленным электрооборудованием (ЭО), таким образом, качественное и надежное электроснабжение (ЭСН) критически важно для их работы. Основные производственные электроприемники: различные металлообрабатывающие и прочие станки и технологические линии, сварочное оборудование различного типа, электрические печи, освещение зданий и территории, электроприводы вентиляции, водоснабжения, водоотведения, компрессорных систем и прочих вспомогательных систем.

Актуальность темы работы состоит в необходимости обеспечения группы цехов планируемого к постройке предприятия – трубопрокатного завода стабильным и качественным питанием электрической энергией. Без этого данный завод невозможно ввести в эксплуатацию и наладить производство трубопрокатной продукции.

Цель работы: реализация качественного и надежного электроснабжения завода.

Задачи работы:

- рассчитать электрические нагрузки;
- составить план внутренней распределительной сети, выбрать кабели;
- выбрать электрооборудование системы электроснабжения, рассчитать токи короткого замыкания (КЗ), проверить выбранное ЭО по режимам КЗ и рабочим режимам.

Практическая значимость работы состоит в последующей реализации предлагаемой СЭС и запуске производства на объекте.

1 Характеристика предприятия, исходные данные для разработки системы электроснабжения

1.1 Характеристика предприятия

Трубопрокатный завод – это крупное предприятие промышленности, обеспечивающее производство труб для транспортировки жидкостей и газов, а также для строительства и энергетической отрасли. На таком предприятии сочетаются высокие технологии, опыт специалистов и строгий контроль качества, что позволяет создавать изделия, способные обеспечить надежную эксплуатацию даже в самых экстремальных условиях. Используя различные сплавы, можно получить продукцию с требуемыми свойствами. Одним из ключевых этапов производства на трубопрокатном заводе является подготовка сырья. Обычно используется высококачественная сталь, обладающая необходимыми механическими характеристиками: прочностью, пластичностью и устойчивостью к коррозии. Применяя современные марки сталей, возможно получить высококачественную продукцию, например, для постройки магистральных трубопроводов. От правильного выбора материала во многом зависит долговечность и надежность конечного продукта. Поэтому заводы строго следят за качеством поставляемой стали и соблюдением международных стандартов. Используя специальные легирующие добавки, можно изменять механические и химические показатели сплавов. Основной технологический процесс включает несколько этапов. Сначала стальной заготовке придают форму посредством высокотемпературной обработки и деформации на прокатных станах. Регулируя технологические операции, можно задавать требуемые параметры формы изделий. В ходе процесса сталь проходит множество фаз, меняется её внутренняя структура, что улучшает механические свойства и позволяет добиться равномерного распределения химических элементов по всему объёму материала. Современные прокатные линии оснащены

автоматизированными системами, обеспечивающими непрерывный мониторинг технологических параметров. Основу производства составляет группа трубопрокатных цехов, также имеются дополнительные вспомогательные участки.

1.2 Исходные данные на проектирование

Далее систематизированы исходные данные для разработки системы электроснабжения завода. Генплан предприятия показан на рисунке 1.

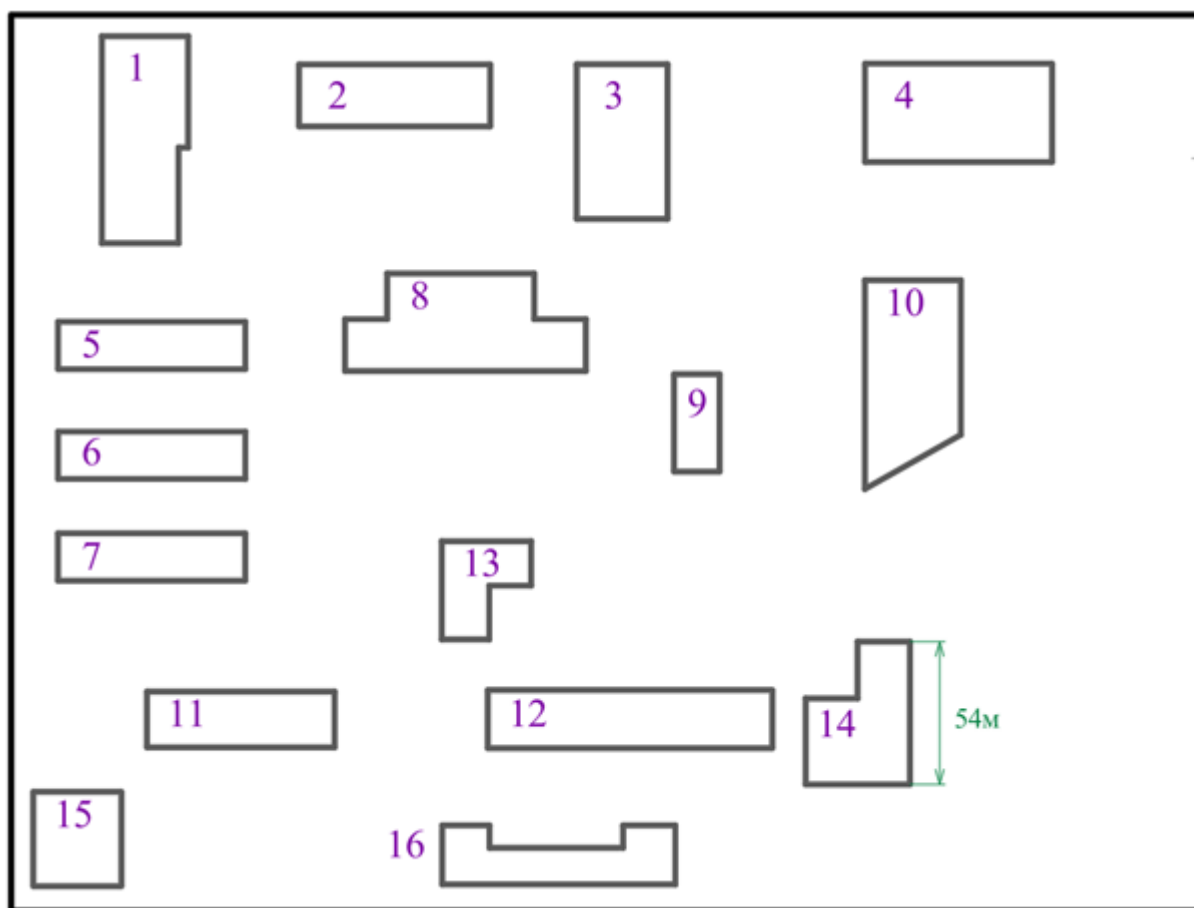


Рисунок 1 – Генплан предприятия

Производственные участки (ПУ), их нагрузки, средневзвешенные коэффициенты мощности и спроса нагрузок систематизированы и приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Производственные участки

Участки	№ на генплане	$\Sigma P_{ном},$ кВт	cosφ	Kс
Трубопрокатный цех	1	3510	0,79	0,41
Компрессорная 0,4 кВ	2	371	0,75	0,7
Компрессорная 10 кВ	2	1500	0,75	0,7
Трубопрокатный цех	3	1790	0,79	0,45
Хранилище	4	74	0,91	0,2
Трубопрокатный цех	5	1290	0,79	0,41
Трубопрокатный цех	6	1290	0,79	0,41
Трубопрокатный цех	7	1290	0,79	0,58
Насосная 0,4 кВ	8	198	0,78	0,6
Насосная 10 кВ	8	1500	0,78	0,6
Котельная	9	695	0,78	0,54
Хранилище	10	62	0,9	0,2
Трубопрокатный цех	11	910	0,79	0,41
Трубопрокатный цех	12	942	0,79	0,41
Механический цех	13	874	0,8	0,42
Ремонтно-механический цех	14	693	0,79	0,31
Испытательный цех	15	758	0,81	0,47
АБК	16	402	0,92	0,31

Источник питания главной понизительной подстанции (ГПП) – подстанция (ПС) энергосистемы, ГПП будет питаться по воздушной линии (ВЛ) 110 кВ с проводами АС-70/11. Категории надежности электроснабжения (КНЭ) участков приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Требования к надёжности электроснабжения участков

Наименования цехов	КНЭ
Трубопрокатный цех	II
Компрессорная	I
Трубопрокатный цех	II
Хранилище	III
Трубопрокатный цех	II
Трубопрокатный цех	
Трубопрокатный цех	
Насосная	I
Котельная	
Хранилище	III
Трубопрокатный цех	II
Трубопрокатный цех	
Механический цех	
Ремонтно-механический цех	
Испытательный цех	
АБК	III

На территории предприятия будет размещаться 16 производственных участков, в основном, это промышленные цеха, специализирующиеся на производстве и сборке элементов выпускаемой продукции и конечного продукта. Вместе со вспомогательными производственными участками, основные производственные цеха образуют цельное крупное предприятие – трубопрокатный завод. Данное предприятие представляет собой огороженную железобетонным забором территорию, на которой расположены все производственные участки. В целом предприятие относится к первой категории надёжности электроснабжения, что обусловлено остановкой основного технологического процесса, массовым браком сырья и продукции в случае перерывов электроснабжения.

Будет выполнен расчет электрической сети ремонтно-механического цеха (РМЦ) и выбор ее оборудования.

Ремонтно-механический цех предприятия занимает важное место в промышленном производстве, обеспечивая оперативное и качественное обслуживание оборудования, снижая простои и повышая общую эффективность работы организации. Этот цех – неотъемлемая часть любой производственной системы, где своевременное техническое обслуживание и ремонт выступают гарантом непрерывного процесса производства. Проводя своевременный плановый ремонт оборудования, возможно обеспечить непрерывность производства. Основная задача РМЦ заключается в поддержании работоспособности технологического оборудования и машин, что является залогом стабильного функционирования всего предприятия. В современных условиях динамичного развития технологий, где время простоя оборудования может привести к значительным финансовым потерям, оперативный ремонт и профилактическое техническое обслуживание становятся стратегическим приоритетом. Реализуя на предприятии работу собственного РМЦ, возможно повысить общую эффективность производства. Здесь работают высококвалифицированные инженеры и техники, способные оперативно выявить дефекты, провести качественную диагностику и предложить оптимальные решения для восстановления работоспособности механизмов. Цех оснащён разнообразным инструментом, современными измерительными приборами и специализированным оборудованием, что позволяет выполнять работы различного уровня сложности. Обслуживая и модернизируя промышленное оборудование, можно повышать эффективность технологических процессов. Ремонт могут включать как замену изношенных деталей, так и проведение сложных технологических операций, направленных на модернизацию устройств и повышение их эксплуатационных характеристик.

План РМЦ с расположением оборудования показан на рисунке 2.

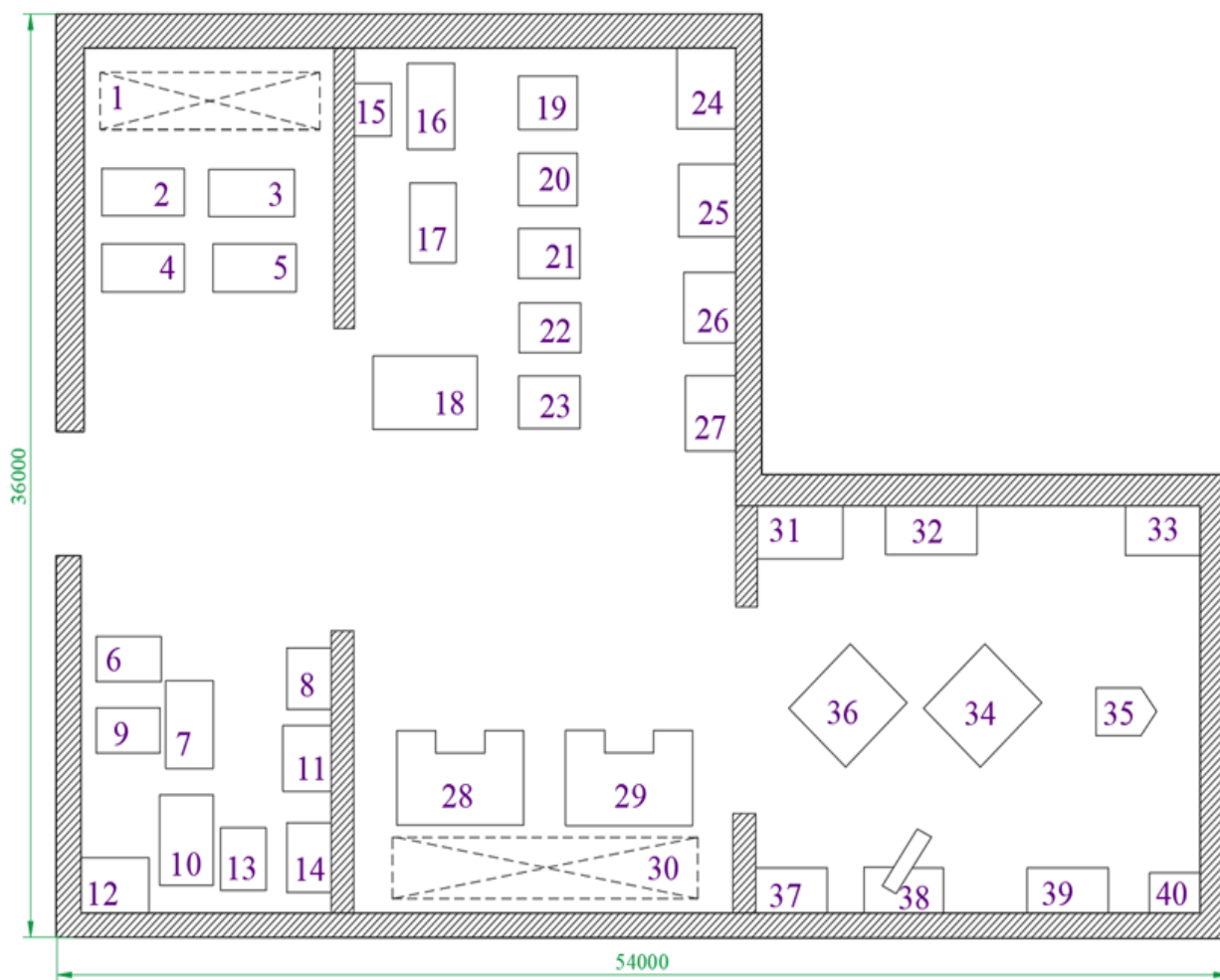


Рисунок 2 – План ремонтно-механического цеха

Перечень электрооборудования РМЦ приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Перечень электрооборудования РМЦ

Наименование	№ на плане
Кран	1,30
Станок универсальный	2-5
Токарный станок	6-8,10
Фрезерный станок	9,26
Шлифовальный станок	11,37

Продолжение таблицы 3

Наименование	№ на плане
Сварочный пост	12-14,24
Печь электрическая	15,27
Шкаф сушильный	16,17,31,32
Гидропресс	18
Сварочный полуавтомат	19-23,25
Точечная сварка	28,29
Пресс	34,36
Горн электрический	33,40
Вентилятор	35
Кран	38
Электроплита	39

Асинхронные электродвигатели станков и сварочное оборудование составляют основную часть нагрузки цеха. Кран и сварочное оборудование, как электроприемники, имеют повторно-кратковременный режим работы (ПКР), то есть работают в полную мощность непродолжительно, через регулярные перерывы по времени.

Выводы по разделу. Приведена краткая характеристика предприятия, исходные данные для разработки системы электроснабжения. Систематизированы электрические нагрузки по предприятию и ремонтно-механическому цеху. Завод представляет собой территорию с группой трубопрокатных цехов и другими ПУ. На территории предприятия будет размещаться 16 производственных участков, в основном, это промышленные цеха, специализирующиеся на производстве трубопрокатной продукции. В работе будет выполнен расчет электрической сети РМЦ и выбор ее оборудования, приведен план цеха и перечень оборудования.

2 Разработка системы электроснабжения группы цехов трубопрокатного завода

2.1 Определение электрических нагрузок

Одной из важнейших стадий проектирования систем электроснабжения является расчёт электрических нагрузок. Этот процесс позволяет не только определить требуемую мощность, но и обеспечить оптимальное распределение энергии, снизить операционные затраты и повысить уровень безопасности. Зная установленные электрические мощности по производственным участкам, возможно достаточно точно рассчитать ожидаемые нагрузки потребителей. Для разработки системы электроснабжения важно учитывать не только текущие потребности, но и перспективы расширения или модернизации производства. В этом контексте расчёт нагрузок должен быть достаточно гибким и масштабируемым, что позволяет адаптировать энергетическую инфраструктуру к изменениям в производственных процессах. Учитывая перспективы возможного подключения новых электроприемников, возможно спроектировать СЭС с достаточным резервом мощности. Грамотный расчет электрических нагрузок способствует снижению потерь электроэнергии, продлению срока службы оборудования и уменьшению вероятности аварийных ситуаций. Результаты проведённого анализа служат фундаментом для проектирования кабельных трасс, выбора трансформаторных подстанций, распределительных устройств и средств автоматического управления. Учитывая полученные расчетные нагрузки по участкам СЭС, возможно правильно выбрать ее электрооборудование, с соответствующими техническими характеристиками. Каждая из этих составляющих системы электроснабжения должна быть рассчитана с учётом спецификации нагрузок, что обеспечивает высокий уровень надежности и эффективность эксплуатации системы [4]. Таким образом, расчёт электрических нагрузок является неотъемлемой частью

разработки систем электроснабжения предприятия, способствуя созданию безопасной, гибкой и энергоэффективной инфраструктуры.

«Для расчета электрических нагрузок производственных участков используется метод коэффициента спроса активной нагрузки. Формулы для расчета среднесменных активных, реактивных и полных нагрузок по участкам:

$$P_c = K_c \cdot P_{ном}, \quad (1)$$

где K_c – коэффициент спроса;

$P_{ном}$ – нагрузка, кВт.

$$Q_c = P_c \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (2)$$

$$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2}. \quad (3)$$

Участок №1, по (1-3)» [7]:

$$P_c = 0,41 \cdot 3510 = 1439,1 \text{ кВт},$$

$$Q_c = 1439,1 \cdot 0,776 = 1116,86 \text{ квар},$$

$$S_c = \sqrt{1439,1^2 + 1116,86^2} = 1821,65 \text{ кВА}.$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Нагрузки предприятия

Цеха	$\Sigma P_{ном}$, кВт	$\operatorname{tg} \varphi$	K_c	Среднесменные нагрузки		
				P_c , кВт	Q_c , квар	S_c , кВА
Трубопрокатный цех	3510	0,776	0,41	1439,1	1116,86	1821,65
Компрессорная 0,4 кВ	371	0,882	0,7	259,70	229,03	346,27

Продолжение таблицы 4

Цеха	$\Sigma P_{ном}, \text{кВт}$	$\text{tg}\varphi$	K_c	Среднесменные нагрузки		
				$P_c, \text{кВт}$	$Q_c, \text{квар}$	$S_c, \text{кВА}$
Компрессорная 10 кВ	1500	0,882	0,7	1050,00	0,00	1050,00
Трубопрокатный цех	1790	0,776	0,45	805,50	625,14	1019,62
Хранилище	74	0,456	0,2	14,80	6,74	16,26
Трубопрокатный цех	1290	0,776	0,41	528,90	410,47	669,49
Трубопрокатный цех	1290	0,776	0,41	528,90	410,47	669,49
Трубопрокатный цех	1290	0,776	0,58	748,20	580,67	947,09
Насосная 0,4 кВ	198	0,802	0,6	118,80	95,31	152,31
Насосная 10 кВ	1500	0,802	0,6	900,00	0,00	900,00
Котельная	695	0,802	0,54	375,30	301,10	481,15
Хранилище	62	0,484	0,2	12,40	6,01	13,78
Трубопрокатный цех	910	0,776	0,41	373,10	289,56	472,28
Трубопрокатный цех	942	0,776	0,41	386,22	299,74	488,89
Механический цех	874	0,750	0,42	367,08	275,31	458,85
Ремонтно-механический цех	693	0,776	0,31	214,83	166,73	271,94
Испытательный цех	758	0,724	0,47	356,26	257,93	439,83
АБК	402	0,426	0,31	124,62	53,09	135,46
Итого	-	-	-	8603,71	5124,15	10014,03

«Нагрузка освещения рассчитывается методом удельной нагрузки.

Расчетные активные и реактивные нагрузки освещения по участкам:

$$P_{po} = P_0 \cdot K_{co} \cdot F, \quad (4)$$

где P_0 – удельная мощность, Вт/м²;

K_{co} – коэффициент спроса освещения;

F – площадь здания, м².

$$Q_{po} = P_{po} \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (5)$$

Освещение обеспечивается современными светодиодными светильниками» [14].

Современные тенденции в области энергосбережения и экологии привели к бурному развитию технологий, связанных со светодиодным освещением (СДО). Преимущества использования светодиодных источников света стали очевидными как для частного потребителя, так и для предприятий, благодаря их энергоэффективности, длительному сроку службы и минимальному воздействию на окружающую среду. Используя светодиодные светильники, предприятия получают существенные выгоды. Одним из основных преимуществ СДО является высокая энергоэффективность. Светодиоды потребляют значительно меньше электроэнергии по сравнению с традиционными лампами накаливания или люминесцентными источниками света, при этом обеспечивая равномерное и яркое освещение [11]. Используя светодиодные светильники, предприятия существенно сокращают затраты по оплате электроэнергии. Это позволяет предприятиям также уменьшить общий углеродный след, что особенно актуально в условиях глобального стремления к устойчивому развитию. В среднем, светодиодные лампы работают в 5–10 раз дольше, чем их традиционные аналоги. Используя светодиодные светильники, предприятия снижают эксплуатационные расходы. Это сокращает расходы на обслуживание и замену освещения, что для крупных объектов и промышленных предприятий является важным фактором экономии [1]. Более того, уменьшение частоты замены ламп положительно сказывается на сокращении производственных простоев и снижении затрат на логистику и утилизацию.

Для участка №1 нагрузки освещения, по (4,5):

$$P_{po} = 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95 \cdot 5543 = 20,01 \text{ кВт},$$

$$Q_{po} = 20,01 \cdot 0,329 = 6,583 \text{ квар.}$$

Итого нагрузки ПУ №1:

$$P_p' = 1439,1 + 20,01 = 1459,11 \text{ кВт},$$

$$Q_p' = 1116,863 + 6,583 = 1123,447 \text{ квар},$$

$$S_p' = \sqrt{1459,11^2 + 1123,447^2} = 1841,503 \text{ кВА.}$$

Расчетные нагрузки сведены в таблицу 5.

Таблица 5 – Расчетные нагрузки предприятия

Наименование участков	$P_p'(P_p+P_{po})$, кВт	$Q_p'(Q_p+Q_{po})$, квар	S_p' , кВА
Трубопрокатный цех	1459,110	1123,447	1841,503
Компрессорная 0,4 кВ	272,540	233,258	358,731
Компрессорная 10 кВ	1050,000	0,000	1050,000
Трубопрокатный цех	821,580	630,426	1035,582
Хранилище	22,486	9,272	24,322
Трубопрокатный цех	539,039	413,807	679,558
Трубопрокатный цех	539,039	413,807	679,558
Трубопрокатный цех	758,339	584,002	957,151
Насосная 0,4 кВ	138,705	101,860	172,088
Насосная 10 кВ	900,000	0,000	900,000
Котельная	380,371	302,764	486,156
Хранилище	18,868	8,133	20,546
Трубопрокатный цех	385,064	293,493	484,162
Трубопрокатный цех	405,095	305,949	507,648
Механический цех	374,707	277,819	466,464
Ремонтно-механический цех	225,508	170,239	282,551
Испытательный цех	364,748	260,720	448,349
АБК	136,520	57,003	147,942
Итого	8791,72	5289,59	10260,318
Территория	61,571	20,257	64,818
Всего	8853,290	5309,851	10323,529

«Для выбора места установки ГПП, согласно результатам расчетов нагрузок, строится картограмма нагрузок» [20].

2.2 Картограмма нагрузок, выбор места расположения ГПП

«Картограмма электрических нагрузок (КЭН) предприятия – это графическое представление распределения электрических нагрузок на территории предприятия» [12]. Она служит важным инструментом для планирования и управления электроснабжением, позволяя оптимизировать использование электроэнергии и минимизировать потери. Интерпретация картограммы позволяет сделать выводы о текущем состоянии электроснабжения предприятия и разработать планы по его улучшению:

- определение слабых мест, выявление областей с недостаточной мощностью электросетей или низким качеством электроснабжения;
- выявление зон с высокой нагрузкой, идентификация участков с наибольшей концентрацией потребителей электроэнергии;
- разработка рекомендаций, формулирование предложений по улучшению электроснабжения, таких как установка дополнительных трансформаторов, модернизация сетей или перераспределение нагрузок.

Картограмма нагрузок является ценным инструментом для управления электроснабжением. Она помогает оптимизировать использование электроэнергии, минимизировать потери и планировать будущие потребности в электросетях. Грамотное составление и интерпретация картограммы позволяют предприятию эффективно управлять своими энергоресурсами и снижать операционные затраты. При разработке СЭС предприятия картограмма электрических нагрузок позволяет определить оптимальное место расположения ГПП.

«Картограмма электрических нагрузок представляет собой размещённые по генеральному плану окружности, площади которых соответствуют расчётным нагрузкам цехов. Радиус окружностей:

$$R = \sqrt{\frac{S_p}{\pi \cdot m}}, \quad (6)$$

где S_p – расчетная нагрузка цеха, кВА;

m – масштаб.

Доля осветительной нагрузки:

$$\alpha = 360 \cdot S_{oc} / S_p, \quad (7)$$

где S_{oc} – нагрузка освещения, кВА.

Центр электрических нагрузок (ЦЭН) определяется для нахождения местоположения ГПП. Координаты ЦЭН:

$$x_0 = \frac{\sum_1^n (S_p \cdot x_i)}{\sum_1^n S_p}; \quad y_0 = \frac{\sum_1^n (S_p \cdot y_i)}{\sum_1^n S_p}, \quad (8)$$

где x_i, y_i – координаты центра цеха, м;

n – число цехов, шт» [8].

«ГПП должна располагаться не в ЦЭН, а должна быть смещена в направлении от ЦЭН к источнику внешнего питания за территорию предприятия, чтобы обеспечить удобные подъездные пути и не мешать производственному процессу предприятия, исключить прохождение высоковольтной ЛЭП по территории предприятия» [5].

Расчет координат ЦЭН приведен в таблице 6.

Таблица 6 – Расчет координат ЦЭН

Участки	Xi, м	Yi, м	Sp, кВА	Sp·Xi, кВА	Sp·Yi, кВА
Трубопрокатный цех	55	287,5	1841,503	101283	529432
Компрессорная 0,4 кВ	167,5	310	358,731	60087	111206
Компрессорная 10 кВ	167,5	310	1050,000	175875	325500
Трубопрокатный цех	270	287,5	1035,582	279607	297730
Хранилище	420	300	24,322	10215	7297
Трубопрокатный цех	55	210	679,558	37376	142707
Трубопрокатный цех	55	167,5	679,558	37376	113826
Трубопрокатный цех	55	130	957,151	52643	124430
Насосная 0,4 кВ	197,5	220	172,088	33987	37859
Насосная 10 кВ	197,5	220	900,000	177750	198000
Котельная	302,5	182,5	486,156	147062	88724
Хранилище	400	195	20,546	8218	4006
Трубопрокатный цех	97,5	65	484,162	47206	31471
Трубопрокатный цех	272,5	65	507,648	138334	32997
Механический цех	207,5	115	466,464	96791	53643
Ремонтно-механический цех	410	65	282,551	115846	18366
Испытательный цех	20	17,5	448,349	8967	7846
АБК	240	12,5	147,942	35506	1849
Итого			10323,5	1564131	2126890
Координаты ЦЭН	X, м	Y, м	-	-	-
	151,5	206,0	-	-	-

Для ПУ №1, по (6,7):

$$R = \sqrt{\frac{1841,503}{0,5 \cdot 3,14}} = 34,25 \text{ м,}$$

$$\alpha = 360 \cdot 26,68 / 1841,503 = 5,2^\circ.$$

Расчеты сведены в таблицу 7.

Таблица 7 – Расчет картограммы нагрузок

Участки	R, м	α	Soc, кВА
Трубопрокатный цех	34,25	5,2	26,68
Компрессорная 0,4 кВ	15,12	17,2	17,12
Компрессорная 10 кВ	25,86	0,0	0,00
Трубопрокатный цех	25,68	7,5	21,44
Хранилище	3,94	151,7	10,25
Трубопрокатный цех	20,80	7,2	13,52
Трубопрокатный цех	20,80	7,2	13,52
Трубопрокатный цех	24,69	5,1	13,52
Насосная 0,4 кВ	10,47	55,5	26,54
Насосная 10 кВ	23,94	0,0	0,00
Котельная	17,60	5,0	6,76
Хранилище	3,62	151,1	8,62
Трубопрокатный цех	17,56	11,9	15,95
Трубопрокатный цех	17,98	17,8	25,17
Механический цех	17,24	7,8	10,17
Ремонтно-механический цех	13,42	18,1	14,24
Испытательный цех	16,90	9,1	11,32
АБК	9,71	38,6	15,87

Картограмма нагрузок – на рисунке 3.

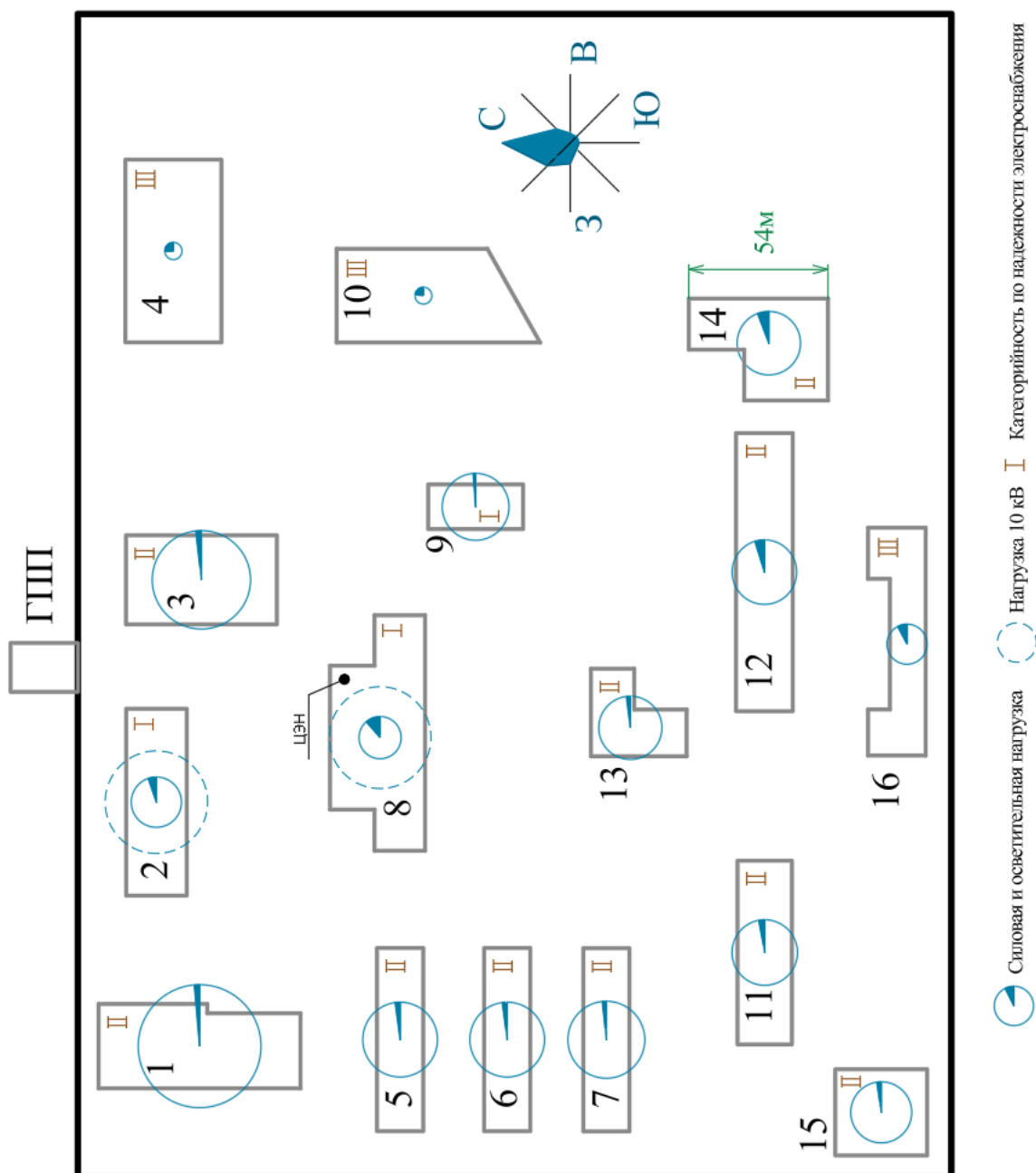


Рисунок 3 – Картограмма нагрузок

«С учетом розы ветров и расположения источника питания, ГПП выносится за территорию» [5].

2.3 Выбор силовых трансформаторов цеховых ТП

Современные промышленные предприятия характеризуются высоким уровнем автоматизации и сложными технологическими процессами, где

надежное электроснабжение играет ключевую роль. В этом контексте цеховые трансформаторные подстанции (ТП) представляют собой важный элемент распределительной сети, а правильно подобранные силовые трансформаторы (СТ) являются залогом стабильности и безопасности работы всего производства. Зная установленные электрические мощности по производственным участкам, возможно достаточно точно рассчитать ожидаемые нагрузки потребителей и выбрать на подстанциях СТ соответствующей мощности. При выборе силовых трансформаторов для цеховых ТП необходимо учитывать комплекс факторов, охватывающих технические, экономические и эксплуатационные аспекты. Одной из основных технических характеристик является мощность трансформатора, которая должна соответствовать суммарной нагрузке потребителей внутри цеха. Учитывая перспективы возможного подключения новых электроприемников, возможно спроектировать СЭС с достаточным резервом мощности. Оптимальный уровень мощности позволяет минимизировать потери энергии, обеспечивает эффективное распределение электрической нагрузки и снижает риск перегрузок, что особенно важно при пиковых режимах работы оборудования. Еще одним важным критерием является коэффициент трансформации, определяющий соответствие между первичными и вторичными обмотками. Учитывая полученные расчетные нагрузки по участкам СЭС, возможно правильно выбрать ее электрооборудование, с соответствующими техническими характеристиками. При выборе силовых трансформаторов необходимо учитывать не только первоначальную стоимость оборудования, но и расходы на его обслуживание, энергоэффективность и возможность модернизации системы при расширении производства.

«Нагрузки производственных участков группируются по ТП 10/0,4 кВ с целью оптимального выбора трансформаторов по мощности, а также обеспечения минимальной суммарной длины линий распределительной сети. Если расчетная нагрузка участка составила менее 250 кВА, то целесообразно

установить РП 0,4 кВ (одно- или двухсекционный), который будет питать от ближайшей ТП другого участка. Если в состав нагрузки ТП входят потребители 1 и 2 категорий надежности электроснабжения, то на ТП устанавливается два силовых трансформатора (как два источника питания).

Оптимальная мощность силовых трансформаторов ТП:

$$S_o = \frac{\sum S_p}{\beta \cdot N}, \quad (9)$$

где $\sum S_p$ – нагрузка потребителей, кВА;

β – нормативный коэффициент загрузки;

N – число трансформаторов, шт.

Допустимая к передаче в сеть 0,4 кВ величина реактивной мощности (РМ):

$$Q_1 = \sqrt{(N \cdot \beta \cdot S_{н.т.})^2 - P_p^2}, \quad (10)$$

где $S_{н.т.}$ – номинальная мощность трансформатора, кВА;

P_p – активная нагрузка, кВт.

Требуемая для компенсации со стороны 0,4 кВ РМ рассчитывается согласно выражению:

$$Q_{0,4} = Q_p - Q_1, \quad (11)$$

где Q_p – реактивная нагрузка, квар.

При полученном отрицательном значении $Q_{0,4}$, либо менее 50 квар, компенсация не требуется. Далее, в случае выбора установок КРМ, рассчитывается остаточное значение РМ согласно выражению» [5]:

$$Q_{HH} = Q_p - Q_{БК}. \quad (12)$$

Для ТП-1 (зона охвата нагрузок – цех №1), по (9):

$$S_o = \frac{1841,5}{0,7 \cdot 2} = 1315 \text{ кВА}$$

Устанавливается два энергоэффективных трансформатора ТМГЗЗ ХЗК2-1600/10 [17].

Энергоэффективные силовые трансформаторы представляют собой важное звено в системе энергоснабжения современного предприятия [3]. В условиях глобального энергетического кризиса и растущей потребности в устойчивом развитии энергоэффективность становится одним из главных приоритетов для промышленных, коммерческих и бытовых объектов. Используя энергосберегающие СТ, предприятия получают существенные выгоды. Трансформаторы, способные минимизировать потери энергии, не только способствуют снижению затрат на электроэнергию, но и снижают негативное воздействие на окружающую среду. Современные технологии в области проектирования силовых трансформаторов направлены на повышение их КПД (коэффициента полезного действия) за счёт оптимизации конструкции и использования передовых материалов. Применяя данные СТ, предприятия существенно сокращают затраты по оплате электроэнергии. Повышенная энергоэффективность достигается за счёт снижения активных и реактивных потерь, улучшения характеристик магнитного поля и применения специальных изоляционных материалов [19]. В результате такие трансформаторы работают с меньшими тепловыми потерями, что существенно продлевает срок их службы и снижает энергозатраты на охлаждение оборудования [16]. Используя такие трансформаторы, предприятия снижают эксплуатационные расходы. Компактность конструкции данных СТ и снижение материальных затрат без компромиссов

по качеству обеспечивают не только экономию инвестиций, но и позволяют предприятию заниматься модернизацией существующих систем электроснабжения. Внешний вид ТМГ33 ХЗК2 показан на рисунке 4.



Рисунок 4 – Трансформатор ТМГ33 ХЗК2

Результаты выбора трансформаторов сведены в таблицу 8.

Таблица 8 – Результаты выбора трансформаторов ТП

№ ТП	Зона охвата (№ участков)	S _{н.т.} , кВА (ТМГ33 ХЗК2)
ТП-1	1	1600
ТП-2	2	400
ТП-3	3,4,10, освещ. терр	1000
ТП-5	5	630
ТП-6	6	630
ТП-7	7	1000
ТП-8	8	160
ТП-9	9	400
ТП-11	11	400
ТП-12	12,16	630
ТП-13	13	400
ТП-14	14	250
ТП-15	15	400

Расчет КРМ на ТП-1, по (10,11):

$$Q_1 = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 1600)^2 - 1459,11^2} = 1699,59 \text{ квар},$$

$$Q_{0,4} = 1123,45 - 1699,59 = -576 \text{ квар}.$$

КРМ не требуется. Коэффициент загрузки трансформатора в послеаварийном режиме:

$$K_n = \frac{S_{p.ком.}}{S_{н.т.}}, \quad (13)$$

$$K_n = \frac{1841,5}{1600} = 1,15 \leq 1,4.$$

Расчет КРМ на ТП и проверка трансформаторов по перегрузке приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Расчет КРМ на ТП и проверка трансформаторов по перегрузке

Подстанции	$Q_{0,4}$, квар	K_n
ТП-1	-576	1,15
ТП-2	-256	0,90
ТП-3	-383	1,14
ТП-5	-284	1,08
ТП-6	-284	1,08
ТП-7	-593	0,96
ТП-8	-74	1,08
ТП-9	-108	1,22
ТП-11	-113	1,21
ТП-12	-333	1,03
ТП-13	-138	1,17
ТП-14	-97	1,13
ТП-15	-164	1,12

Цеховые ТП выбираются комплектные, марки 2КТПН-10/0,4.

Комплектные трансформаторные подстанции (КТП) представляют собой современное и эффективное решение для организации распределительных систем электроснабжения на различных объектах [6]. В условиях развития инфраструктуры, модернизации промышленных предприятий и усиливающихся требований к энергоэффективности востребованность КТП продолжает расти. Используя КТП, предприятия получают существенные выгоды. Такие подстанции объединяют в себе компактный дизайн, высокую функциональность и надежность, что делает их незаменимыми в распределительных сетях нового поколения. Одним из ключевых преимуществ комплектных трансформаторных подстанций является их модульность и простота монтажа [9]. Применяя данные ТП, предприятия существенно сокращают затраты по монтажу СЭС. Комплект КТП поставляется в виде готовых блоков, что позволяет существенно сократить сроки монтажа и снизить затраты на строительство и пусконаладочные работы. Благодаря заводской сборке и предварительной пусконаладке, риск ошибок при установке минимизируется, а качество работы оборудования гарантируется строгим контролем на всех этапах производства. Используя такие подстанции, предприятия снижают эксплуатационные расходы. КТП предназначены для обеспечения надежного преобразования и распределения электроэнергии между источниками и потребителями. При этом важное значение имеет безопасность работы подстанции: современные КТП оснащены системами автоматического управления, защиты от перегрузок и коротких замыканий, а также средствами дистанционного мониторинга.

2.4 Выбор силовых трансформаторов ГПП

«Компенсация реактивной мощности (КРМ) будет производиться централизованно на шинах 10 кВ ГПП.

Для расчета нагрузки ГПП необходимо учесть потери в ТП 10/0,4 кВ.
Потери активной и реактивной мощности в трансформаторах:

$$\Delta P_m = \frac{\Delta P_\kappa}{n} \cdot \frac{P_p^2 + Q_p^2}{S_n^2} + n \cdot \Delta P_{xx}, \quad (14)$$

где ΔP_κ – потери КЗ, кВт;

n – число трансформаторов, шт;

S_n – номинальная мощность, кВА;

ΔP_{xx} – потери ХХ, кВт.

$$\Delta Q_m = \frac{U_\kappa}{n \cdot 100} \cdot \frac{P_p^2 + Q_p^2}{S_n^2} + \frac{n \cdot I_{xx}}{100} \cdot S_n, \quad (15)$$

где U_κ – напряжение КЗ, %;

I_{xx} – ток ХХ, %» [5].

Для ТП-1, по (14,15):

$$\Delta P_m = \frac{16}{2} \cdot \frac{1459,11^2 + 1123,45^2}{1600^2} + 2 \cdot 1,7 = 14,0 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_m = \frac{6}{2 \cdot 100} \cdot \frac{1459,11^2 + 1123,45^2}{1600^2} + \frac{2 \cdot 0,5}{100} \cdot 1600 = 79,58 \text{ квар}.$$

Нагрузка ГПП с учетом потерь в ТП рассчитана в таблице 10.

Таблица 10 – Нагрузка ГПП с учетом потерь в ТП

Подстанции	ΔP , кВт	ΔQ , квар	$P_p + \Delta P$, кВт	$Q_p + \Delta Q$, квар
ТП-1	14,00	79,58	1473,11	1203,03
ТП-2	3,11	13,64	275,65	246,90

Продолжение таблицы 10

Подстанции	ΔP , кВт	ΔQ , квар	$P_p + \Delta P$, кВт	$Q_p + \Delta Q$, квар
ТП-3	9,03	47,78	933,53	715,87
ТП-5	5,53	28,98	544,57	442,78
ТП-6	5,53	28,98	544,57	442,78
ТП-7	7,01	37,19	765,35	621,20
ТП-8	1,96	7,68	140,66	109,54
ТП-9	4,66	19,69	385,03	322,46
ТП-11	4,63	19,59	389,69	313,08
ТП-12	5,21	27,38	546,83	390,33
ТП-13	4,39	18,64	379,09	296,46
ТП-14	2,93	11,69	228,43	181,92
ТП-15	4,15	17,71	368,90	278,43
РУ-1	-	-	1050	0
РУ-2	-	-	900	0
Итого	72,13	358,52	8925,41	5668,37

«Требуемая для компенсации на каждой шине 10 кВ ГПП реактивная мощность (РМ):

$$Q_{\text{ку}} / 2 = \frac{Q_{10} + \Delta Q_m - Q_{\text{сист}} - Q_c}{2}, \quad (16)$$

где $Q_{\text{сист}}$, Q_c – РМ из энергосистемы и от СД, квар;

ΔQ_m – предварительные потери РМ в трансформаторах ГПП, квар.

$$Q_{\text{сист}} = \alpha \cdot \sum P_p, \quad (17)$$

где α – эквивалент нормативного $\text{tg}\varphi=0,33$.

$$Q_c = \frac{\alpha_m \cdot P_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_n}{\eta_n}, \quad (18)$$

где α_m – допустимая перегрузка СД;

P_n – номинальная активная мощность СД, кВт;

$\operatorname{tg} \varphi_n$ – коэффициент РМ, по номинальному $\cos \varphi$;

η_n – КПД двигателя, о.е.» [5].

$$\Delta Q_m = \frac{10,5}{2 \cdot 100} \cdot \frac{8925,41^2 + 5668,37^2}{10000^2} + \frac{2 \cdot 0,7}{100} \cdot 10000 = 1200,15 \text{ квар},$$

$$Q_c = \frac{0,92 \cdot 2000 \cdot 0,75}{0,95} = 1452,63 \text{ квар},$$

$$Q_c = \frac{0,92 \cdot 1600 \cdot 0,75}{0,95} = 1162,11 \text{ квар},$$

$$Q_{\text{кв}} / 2 = \frac{5668,37 + 1200,15 - 0,33 \cdot 8853,29 - 1452,63 - 1162,11}{2} = 1695 \text{ квар}.$$

Устанавливается две конденсаторные батареи УККРМ-10,5-850 по 850 квар. Автоматическая компенсация реактивной мощности (АРКМ) представляет собой современное технологическое решение, позволяющее значительно повысить эффективность работы систем электроснабжения. В условиях растущего потребления электроэнергии и усложнения электрических сетей необходимость в стабилизации напряжения и снижении потерь энергии становится особенно актуальной. Используя такие установки, предприятия получают существенные выгоды. АРКМ играет ключевую роль в обеспечении надёжности, безопасности и энергоэффективности электросетей предприятий и городских инфраструктур. Суть процесса автоматической компенсации реактивной мощности заключается в корректировке баланса между активной и реактивной мощностью в системе. Используя АРКМ, предприятия существенно сокращают затраты по оплате за электроэнергию. Реактивная мощность, возникающая в результате работы

индукторных нагрузок, таких как электродвигатели, трансформаторы и другие технические устройства, не приносит полезной работы, но вызывает дополнительные потери в линиях электропередачи. Накопление такого рода мощности может приводить к ухудшению коэффициента мощности, чрезмерным нагрузкам на оборудования и повышенным затратам на электроэнергию. Применяя АРКМ, предприятия снижают расходы на закупку оборудования СЭС. Использование АРКМ позволяет в автоматическом режиме вносить корректировки, компенсируя избыточное потребление реактивной мощности и обеспечивая оптимальный режим работы энергосистемы. Одним из ключевых преимуществ автоматизированных систем компенсации является снижение затрат на энергопотребление.

Реактивная нагрузка ГПП после КРМ:

$$Q_{pk} = 5668,37 - 2 \cdot 850 = 3968,37 \text{ квар},$$

Полная нагрузка ГПП:

$$S_p = \sqrt{(k_{pma} \cdot P_{pk})^2 + (k_{pmp} \cdot Q_{pk})^2}, \quad (19)$$

где k_{pma} и k_{pmp} – коэффициенты разновременности нагрузок.

$$S_p = \sqrt{(0,95 \cdot 8925,41)^2 + (0,95 \cdot 3968,37)^2} = 9279,46 \text{ кВА}.$$

С учетом данной нагрузки выбираются СТ на главной понизительной подстанции.

Устанавливаются трансформаторы ТДН-10000/110, внешний вид приведен на рисунке 5.



Рисунок 5 – Трансформатор ТДН-10000/110

Послеаварийная перегрузка, по (13):

$$K_n = \frac{9279,46}{10000} = 0,93 < 1,4 .$$

Перегрузки не будет.

2.5 Расчет схемы внутризаводского электроснабжения, выбор марок кабелей

«Для распределительной сети выбирается смешанная схема, как обеспечивающая наилучшие технико-эксплуатационные показатели при минимальных капиталовложениях. Кабельные линии на 10 кВ выполняются кабелем АПвП и на 0,4 кВ кабелем АВБШв. Кабели прокладываются в траншеях под землей» [5]. План трасс КЛ – на рисунке 6.

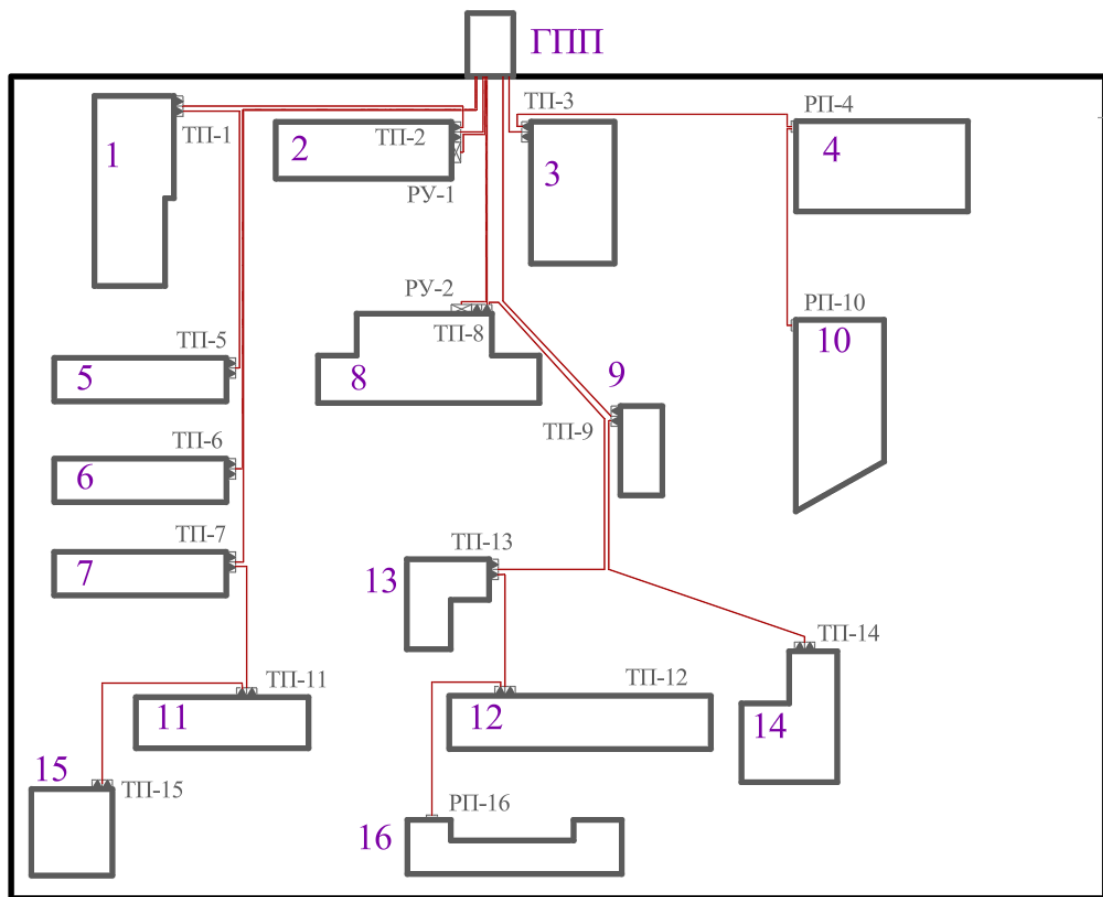


Рисунок 6 – План трасс кабельных линий

Далее выбираются марки кабелей.

Расчет для КЛ до ТП-2.

«Наибольший ток линии:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot n}, \quad (20)$$

где S_p – нагрузка участка, кВА;

n – число цепей, шт.

Экономическое сечение жил:

$$F_{\text{эк}} = \frac{I_p}{j_{\text{эк}}}, \quad (21)$$

где $j_{\text{эк}}$ – экономическая плотность тока, А/мм²» [8].

$$I_p = \frac{2973,8}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 2} = 85,8 \text{ А},$$

$$I_{\text{ав}} = \frac{2973,8}{\sqrt{3} \cdot 10} = 171,7 \text{ А},$$

$$F_{\text{эк}} = \frac{171,7}{1,4} = 61 \text{ мм}^2.$$

С поправкой на аварийный ток выбирается кабель АПвП 3×95 мм²,
 $I_{\text{доп}} = 174 \text{ А}.$

Кабели марки АПвП занимают важное место в системе электроснабжения, обеспечивая надёжную и эффективную передачу электроэнергии в условиях современных требований к безопасности, энергоэффективности и долговечности оборудования. Эти кабели, разработанные с учётом особенностей эксплуатации в промышленных и жилых объектах, демонстрируют высокий уровень технических характеристик, что делает их востребованными как на отечественном, так и на зарубежном рынках. Используя данные кабели, предприятия получают существенные выгоды. Марка АПвП характеризуется использованием современных материалов и передовых технологий производства, позволяющих обеспечить отличные электрические и механические показатели. Основными преимуществами данных кабелей являются высокая степень устойчивости к механическим повреждениям, воздействию агрессивной среды и перепадам температур. Применяя данные кабели, предприятия существенно сокращают затраты по монтажу СЭС. Эти особенности позволяют кабелям марки АПвП успешно функционировать в сложных эксплуатационных условиях, будь то промышленное производство, системы энергораспределения или объекты инфраструктуры. Также важным преимуществом кабелей марки АПвП является их соответствие

международным стандартам качества и безопасности. Используя такие кабели, предприятия снижают эксплуатационные расходы. Прочная изоляция и соблюдение всех норм гарантируют защиту от коротких замыканий, преодоления перегрузок и других аварийных ситуаций.

«Потери напряжения в линии:

$$\Delta U_{\text{л}} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_p \cdot L \cdot 100}{U_n} (r_0 \cdot \cos \varphi + x_0 \cdot \sin \varphi), \quad (22)$$

где I_p – расчетный ток линии, А;

L – длина линии, км;

r_0 и x_0 – удельные сопротивления кабелей, Ом/км;

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности нагрузки» [5].

Согласно [10], потери напряжения не должны превышать 5 %.

Для КЛ до ТП-2:

$$\Delta U_{\text{л}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 171,7 \cdot 0,148 \cdot 100}{10000} (0,326 \cdot 0,891 + 0,09 \cdot 0,514) = 0,02 \% < 5 \% .$$

Остальные КЛ проверяются аналогично.

Выбор кабелей 10 кВ сведен в таблицу 11.

Таблица 11 – Выбор кабелей 10 кВ

Участок	$I_{\text{ав}}$, А	АПвП, сечение жил, мм ²	$I_{\text{доп}}$, А	ΔU , %
ГПП-ТП-2	171,7	95	174	0,02
ТП-2-ТП-1	150,3	95	174	0,32
ТП-1-ТП-5	40,5	16	64	0,53
ГПП-ТП-7	112,5	50	119	1,09

Продолжение таблицы 11

Участок	I _{ав} , А	АПвП, сечение жил, мм ²	I _{доп} , А	ΔU, %
ТП-7-ТП-11	55,5	16	64	0,31
ТП-11-ТП-15	26,7	16	64	0,27
ГПП-ТП-8	76,9	25	77	0,46
ТП-8-ТП-13	66,6	25	77	0,75
ТП-13-ТП-12	38,8	16	64	0,19
ГПП-ТП-9	45,9	16	64	0,73
ТП-9-ТП-14	16,9	16	64	0,25
ГПП-ТП-3	67,9	25	77	0,12
ГПП-ТП-6	40,5	16	64	1,06
ГПП-РУ-1	75,8	25	77	0,20
ГПП-РУ-2	65,0	25	77	0,43

Выбор кабелей 0,4 кВ аналогичен, результаты сведены в таблицу 12.

Таблица 12 – Выбор кабелей 0,4 кВ

Участок	I _р , А	Сечение АВБШв, мм ²	I _{доп} , А	ΔU, %
ТП3-РП4	68,2	4x10	75	1,86
РП4-РП10	31,2	4x4	42	1,29
ТП12-РП16	224,8	4x95	260	1,14

Электрооборудование ГПП выбирается с учетом режимов КЗ.

2.6 Определение токов короткого замыкания

Расчёт токов короткого замыкания (ТКЗ) является одной из ключевых задач при проектировании и эксплуатации электрических сетей предприятия. Этот процесс предоставляет возможность выявления потенциально опасных режимов работы системы, позволяет обеспечить своевременное срабатывание средств защиты и минимизировать ущерб в случае аварийных ситуаций. Зная ТКЗ по местам установки электрооборудования СЭС, можно правильно выбрать его марки. Грамотное проведение расчётов токов КЗ имеет решающее значение для безопасности, надежности и экономической

эффективности работы энергосистемы. Одной из основных целей расчёта токов короткого замыкания является определение величины токов, которые могут протекать по проводящим элементам в случае возникновения замыканий. Имея данные по расчету ТКЗ в сети предприятия, возможно обеспечить ее безопасность и надежность. Эти показатели непосредственно влияют на выбор оборудования для защиты, таких как автоматические выключатели, реле и предохранители, а также на корректное ранжирование зон защиты на предприятии. При несоответствии характеристик защитных устройств режимам короткого замыкания возможно возникновение опасных для оборудования и персонала ситуаций, что может привести к серьезным авариям и значительным финансовым потерям. Обладая данными по расчету ТКЗ в электрической сети, возможно правильно выбрать уставки релейной защиты. Расчёт токов КЗ представляет собой комплексный процесс, требующий учёта различных параметров: характеристик источников питания, сопротивления трансформаторов, линий электропередачи, соединительных проводов и других элементов сети.

Схема электрической сети и схема замещения показаны на рисунке 7.

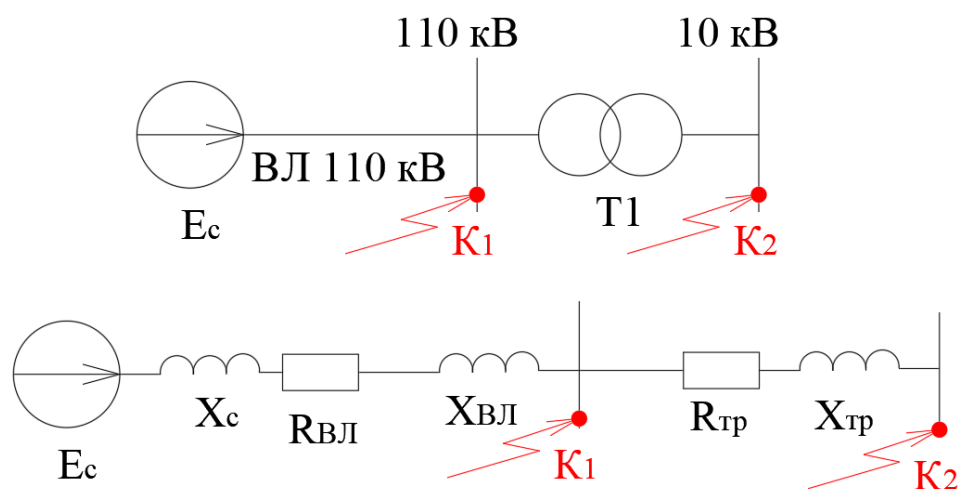


Рисунок 7 – Схема электрической сети и схема замещения

«Полное сопротивление цепи КЗ:

$$z = \sqrt{\left(\Sigma r^{\circ}\right)^2 + \left(\Sigma x^{\circ}\right)^2}, \quad (23)$$

где Σr° , Σx° – активное и индуктивное сопротивления цепи, Ом.

Сопротивления трансформаторов:

$$R_m = \Delta P_{\kappa} \cdot U_{н.в.}^2 / (S_{н.}^2 \cdot 1000), \quad (24)$$

где ΔP_{κ} – потери КЗ, кВт;

$U_{н.в.}$ – напряжение ВН, кВ;

$S_{н.}$ – номинальная мощность, кВА.

$$Z_m = \Delta U_{\kappa} / 100 \cdot 10^2 / S_{н.}, \quad (25)$$

где ΔU_{κ} – потери напряжения КЗ, %» [5].

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}. \quad (26)$$

«Токи трехфазного и двухфазного КЗ:

$$I_{\kappa\text{З}}^{(3)} = \frac{U_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot z}, \quad (27)$$

$$I_{\kappa\text{З}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\kappa\text{З}}^{(3)}. \quad (28)$$

Ударный ток КЗ:

$$I_y = I_{\kappa\text{З}}^{(3)} \cdot \sqrt{1 + 2(\kappa_y - 1)^2}, \quad (29)$$

где κ_y – ударный коэффициент.

$$\kappa_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}, \quad (30)$$

где T_a – постоянная апериодической слагающей, с» [5].

$$T_a = \frac{\sum X}{314 \cdot \sum R}. \quad (31)$$

Пример расчета токов КЗ на стороне 10 кВ ГПП (точка К2).

Сопротивление энергосистемы:

$$X_c = \frac{U_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{к.ЭС}}}, \quad (32)$$

где $I_{\text{к.ЭС}}$ – трехфазный ток КЗ в начале ВЛ 110 кВ, кА.

$$X_c = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 9,107} = 7291 \text{ мОм}.$$

Сопротивления трансформаторов ГПП, по (24-26):

$$R_m = \frac{60000 \cdot 115^2}{10000^2} \cdot (10,5 / 115)^2 = 0,06 \text{ Ом},$$

$$Z_m = \frac{10,5 \cdot 115^2}{100 \cdot 10^2} \cdot (10,5 / 115)^2 = 1,05 \text{ Ом},$$

$$X_m = \sqrt{1,05^2 - 0,06^2} = 1,048 \text{ Ом}.$$

Сопротивления ВЛ:

$$R_{\text{вл}} = 0,429 \cdot 12 \cdot \left(\frac{10,5}{115}\right)^2 = 21,5 \text{ мОм},$$

$$X_{\text{вл}} = 0,444 \cdot 12 \cdot \left(\frac{10,5}{115}\right)^2 = 22,2 \text{ мОм.}$$

Эквивалентные сопротивления цепи КЗ:

$$\Sigma r = R_{\text{БЛ}} + R_{\text{м.ГПП}}, \quad (33)$$

$$\Sigma r = 21,5 + 60 = 81,5 \text{ мОм,}$$

$$\Sigma x = X_{\text{С}} + X_{\text{БЛ}} + X_{\text{м.ГПП}}, \quad (34)$$

$$\Sigma x = 7291 + 22,2 + 1048 = 8361,2 \text{ мОм,}$$

$$z = \sqrt{81,5^2 + 8361,2^2} = 8362 \text{ мОм.}$$

По формулам (27–31):

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 8362} = 7,941 \text{ кА,}$$

$$I_{\text{КЗ}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 7,941 = 6,877 \text{ кА,}$$

$$T_a = 8361,2 / (314 \cdot 81,5) = 0,3269,$$

$$\kappa_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,3269}} = 1,97,$$

$$I_y = 7,941 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1,97 - 1)^2} = 13,479 \text{ кА.}$$

Для точки К1 расчет аналогичен. Результаты сведены в таблицу 13.

Таблица 13 – Результаты расчетов токов КЗ

Точки КЗ	$I_{\text{к}}^{(3)}$, кА	I_y , кА	$I_{\text{к}}^{(2)}$, кА
К1	9,08	15,63	7,86
К2	7,94	13,48	6,88

«Согласно данным результатам расчетов выбирается электрооборудование ГПП. ЭО проверяется по допустимым параметрам по местам установки» [5].

2.7 Выбор оборудования электрической части ГПП

Вакуумные высоковольтные выключатели (ВВ) занимают особое место благодаря своим превосходным эксплуатационным характеристикам. Принцип действия основывается на использовании высококачественного вакуума в качестве среды гашения дугового разряда, при размыкании контактов в замкнутой цепи между разъединяемыми элементами образуется электрический разряд. Используя данные выключатели, предприятия получают существенные выгоды. Вакуум, обладая высоким диэлектрическим сопротивлением, позволяет эффективно прекратить проводимость этого разряда, предотвращая образование устойчивой дуги. Основные компоненты вакуумного выключателя включают:

- контактную систему – обеспечивающую быструю и надежную коммутацию тока;
- камеру с вакуумом – где происходит гашение дугового разряда, поддерживаемая специальными вакуумными трубками;
- систему управления – позволяющую автоматизировать процесс размыкания и замыкания цепи в соответствии с заданными параметрами сети.

Применяя данные кабели, предприятия существенно сокращают затраты по монтажу и эксплуатации СЭС. Основные преимущества данных устройств:

- высокая скорость гашения дуги: благодаря вакууму, разряд гасится очень быстро, что способствует уменьшению тепловыделения и снижению износа контактной системы;
- экологическая безопасность;

- минимизация обслуживания, конструкция выключателя, как правило, требует менее частого технического обслуживания, так как вакуумная камера не подвержена загрязнению;
- долговечность и надежность.

«Условия выбора выключателей:

$$U_{ном} \geq U_{раб}, \text{ кВ}, \quad (35)$$

$$I_{ном} \geq I_{раб}, \text{ кВ}, \quad (36)$$

$$I_{ном.откл} \geq I_{\kappa}, \text{ кА}, \quad (37)$$

где $I_{ном.откл}$ – ток отключения, кА;

I_{κ} – ток трехфазного КЗ, кА.

$$i_{пр.с} \geq i_y, \text{ кА}, \quad (38)$$

где $i_{пр.с}$ – сквозной ток КЗ, кА;

i_y – ударный ток КЗ, кА.

$$I_m^2 \cdot t_m \geq B_{\kappa}, \text{ кА}^2 \cdot \text{с}, \quad (39)$$

где I_m – ток термической стойкости, кА;

t_m – время протекания тока, с;

B_{κ} – тепловой импульс, кА²·с.

Условия выбора разъединителей» [13]:

$$U_{н.ант.} \geq U_{н.уст.}, \quad (40)$$

$$I_{н.ант.} \geq I_{раб.мах.}, \quad (41)$$

$$I_{тер.}^2 \cdot t_{тер.} \geq B_{\kappa}, \quad (42)$$

$$i_{дин} \geq i_y. \quad (43)$$

Выбор коммутационных аппаратов сведен в таблицу 14.

Таблица 14 – Выбор коммутационных аппаратов

Параметры	ОРУ			ЗРУ	
	По расчету	По паспорту, ВБП-110/2000	По паспорту, РНДЗ-110/1000	По расчету	По паспорту, ВВ/TEL-10/630
U _{ном} , кВ	110	110	110	10	10
I _{ном} , А	58,5	2000	1000	607,2	630
I _{н.откл.} , кА	9,08	40	20	7,9	20
B _к , кА ² ·с	10,3	4200	1200	7,83	1200
i _{дин} , кА	15,63	52	40	13,5	20

Выбор ОПН.

Для защиты оборудования ОРУ со стороны 110 кВ устанавливаются ОПН-110/88/10/450-У1. Со стороны 10 кВ устанавливаются ОПН-10/11,5-10/400-У1.

Выбор трансформаторов тока и напряжения.

Согласно напряжениям в местах установки и полученным расчетным токам выбираются трансформаторы тока (ТТ): на фидерах 10 кВ: ТПЛК-10-30...200/5; на вводах ЗРУ 10 кВ: ТПЛК-10-800/5; на ОРУ 110 кВ: ТФНД-110-75/5.

Проверка ТТ в режиме КЗ:

– в ЗРУ 10 кВ:

По динамической стойкости: $i_{дин} = 74,5 \text{ кА} \geq i_{уд} = 13,5 \text{ кА}$.

По термической стойкости: $I_m^2 \cdot t_m = 2900 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \geq B_k = 6,1 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$.

– на ОРУ 110 кВ:

$$i_{дин} = 42 \text{ кА} \geq i_{уд} = 15,63 \text{ кА},$$

$$I_m^2 \cdot t_m = 3600 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \geq B_k = 10,3 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Условия выбора трансформаторов напряжения (ТН):

$$U_{ном} \geq U_{уст}, \quad (44)$$

$$S_{ном} \geq S_{2\Sigma}. \quad (45)$$

Принимаем ТН типа НАМИ-10-95.

$$U_{н.шт.} = 10 \text{ кВ} \geq U_{н.уст.} = 10 \text{ кВ},$$

$$S_{ном} = 200 \text{ ВА} \geq S_{2\Sigma} = 51 \text{ ВА}.$$

ТТ и ТН проходят проверку.

Выбор ячеек КРУ.

Ячейки КРУ являются модульными конструктивными элементами, обеспечивающими компактное и надежное размещение оборудования: автоматических выключателей, реле защиты, трансформаторов тока и напряжения, а также другого коммутационного и измерительного оборудования. Основные функции ячеек КРУ включают:

- организацию безопасного распределения электроэнергии;
- обеспечение быстрого доступа к рабочим элементам для проведения технического обслуживания или ремонта;
- минимизацию возможных ошибок при монтаже за счет стандартизации и модульности конструкции;
- упрощение контроля и диагностики систем энергоснабжения.

Используя современные КРУ, предприятия получают существенные выгоды. Ячейки КРУ отличаются высокой степенью стандартизации, что позволяет легко интегрировать их в сложные схемы распределения электрической энергии. Конструкция ячейки предусматривает надежное крепление элементов, защиту от внешних воздействий (влажности, пыли, механических повреждений) и возможность установки вспомогательных

систем охлаждения или вентиляции. Применяя КРУ, предприятия существенно сокращают затраты по монтажу и эксплуатации СЭС. Современные комплектные распределительные устройства часто реализуются на основе модульного принципа: каждая ячейка функционирует как самостоятельный блок, который легко подключается к общей системе. Такой подход позволяет при необходимости оперативно заменять отдельные блоки или расширять функциональные возможности оборудования без полной замены всей установки.

Принимаются к установке КРУ марки К-204-ЭП.

2.8 Выбор оборудования электрической сети ремонтно-механического цеха

Внутреннее электроснабжение цеха выполняется по радиальной схеме питания электроприемников от цеховой ТП, рисунок 8.



Рисунок 8 – План силовой сети цеха

«Радиальная схема внутреннего электроснабжения цеха обеспечит повышенную надежность питания электроприемников, точную и селективную работу аппаратов защиты линий питания. Также будет обеспечена возможность индивидуального отключения участков сети по отдельным электроприемникам, что обеспечит их удобный вывод в ремонт, без остановки общего производственного процесса.

Линии питания электроприемников выполняются кабелем АВВГнг-LS, проложенными в защитных коробах в полу помещения (кабелями КГнг-LS в металлолофре для подвижных ЭП).

Выбор кабелей и автоматических выключателей для линии до электроприемника №1.

Наибольший ток линии:

$$I_p = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi}, \quad (46)$$

где P_n – номинальная активная нагрузка, кВА;

U_n – напряжение линии, кВ» [2].

$$I_p = \frac{25,34}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 0,5} = 73,16 \text{ А}.$$

Выбирается кабель КГнг-LS-5×10, $I_{\text{доп}} = 75 \text{ А}$.

«При расчете потерь напряжения в сети до 1 кВ индуктивным сопротивлением проводов можно пренебречь ввиду его очень малого значения» [15]. По формуле (22):

$$\Delta U_{\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot 73,16 \cdot 32,67 \cdot 100}{380} (0,0018 \cdot 0,5 + 0 \cdot 0,866) = 0,98 \% < 5 \ \%.$$

«Выбор автоматических выключателей (АВ) проводится:

– по напряжению:

$$U_{ном} > U_c, \quad (47)$$

– по току теплового расцепителя (ТР):

$$I_{т.р.} > 1,1 \cdot I_p. \quad (48)$$

Для КЛ до электроприемника №1:

$$I_{т.р.} > 1,1 \cdot 73,16 = 80,5 \text{ А}.$$

Устанавливается ВА-51-35 на номинальный ток 100 А» [15].
Результаты выбора кабелей и АВ сведены в таблицу 15.

Таблица 15 – Результаты выбора кабелей и АВ силовой сети цеха

№ электроприемника/РП	Кабель АВВГнг-LS, сечение жил, мм ²	Авт. выкл.	Іном, А
1	КГнг-LS-4×10	ВА-51-35	100
2	4×6	ВА-51-25	32
3			
4			
5			
15	4×16	ВА-51-35	80
16	4×10	ВА-51-25	50
17			
18	3×50+1×25	ВА-52-39	160
ΣРП-1	2×(3×150+1×95)		630
19	4×16	ВА-51-35	80
20			
21			
22			
23			

Продолжение таблицы 15

№ электроприемника/РП	Кабель АВВГнг-LS, сечение жил, мм ²	Авт. выкл.	Ином, А
24	4×10	BA-51-25	63
25	4×16	BA-51-35	80
26	4×4	BA-51-25	25
27	4×16	BA-51-35	80
ΣРП-2	2×(3×150+1×95)	BA-52-39	630
6	4×10	BA-51-25	50
7			
8			
9	4×4		25
10	4×10		50
11	4×2,5		16
12	4×10		63
13			
14			
28	4×10		40
29			
30	КГнг-LS-4×10	BA-51-35	100
ΣРП-3	2×(3×150+1×95)	BA-52-39	630
31	4×10	BA-51-25	50
32			
33	4×4		20
34	4×16	BA-51-35	100
35	4×4	BA-51-25	25
36	4×16	BA-51-35	100
37	4×2,5	BA-51-25	16
38	4×4		25
39			
40			
ΣРП-4	3×185+1×95	BA-52-39	400

Основным преимуществом кабеля АВВГнг-LS является его высокая эксплуатационная надежность. Благодаря многожильной конструкции и использованию специальной изоляции, этот тип кабеля способен

выдерживать значительные механические нагрузки, а также работать в условиях перепадов температур и повышенной влажности. Используя данные выключатели, предприятия получают существенные выгоды. Такие кабели часто устанавливаются в местах с высокими рисками повреждений, где надежность системы электроснабжения становится критически важной. С точки зрения технических характеристик, кабель АВВГнг-LS обладает рядом отличительных особенностей. Применяя данные кабели, предприятия существенно сокращают затраты по монтажу СЭС. Конструкция предусматривает хорошую гибкость, что облегчает монтаж в сложных условиях и позволяет проводить его по изогнутым маршрутам без риска повреждения внутренней армированной структуры. Материал оболочки и изоляции разработан таким образом, чтобы обеспечивать устойчивость к воздействию агрессивных сред – масел, химикатов и ультрафиолетового излучения. Используя такие кабели, предприятия снижают эксплуатационные расходы. Эффективность и безопасность эксплуатации такого кабеля напрямую связаны с соблюдением стандартов качества, установленных отраслевыми нормативами. Кабели производятся с учётом всех современных требований экологической безопасности: используются технологии, снижающие негативное воздействие на природу.

Освещение выполняется светодиодными светильниками WebStar 105W (модулями по 4 светильника).

«Освещение рассчитывается методом коэффициента использования светового потока.

Число светильников:

$$N = \frac{E_H \cdot Z \cdot F \cdot K_3}{K_H \cdot \Phi}, \quad (49)$$

где E_H – норма освещенности, лк;

Z – коэффициент минимальной освещенности;

F – площадь участка, м²;

K_3 – коэффициент запаса;

K_{II} – коэффициент использования светового потока;

Φ – световой поток светильника, лм.

Индекс помещения:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)}, \quad (50)$$

где A, B, h – длина, ширина и высота помещения, м.

$$i = \frac{36 \cdot 54}{8 \cdot (36 + 54)} = 2,7,$$

$$N = \frac{200 \cdot 1,5 \cdot 1555,2 \cdot 1,1}{0,625 \cdot (4 \cdot 13120)} \approx 16 \text{ шт.}$$

Аварийное освещение (АО) выбирается как не менее 5% от основного, требуемая мощность АО» [18]:

$$P_{ав} \geq 0,05 \cdot (105 \cdot 4 \cdot 16) = 336 \text{ Вт}$$

Принимается 6 светильников Атлант мощностью 60 Вт.

План осветительной сети цеха показан на листе 6 графической части.

Выводы по разделу. Выполнен расчет системы электроснабжение группы цехов трубопрокатного завода, согласно рассчитанным электрическим нагрузкам выбрано ее оборудование, отечественного производства от проверенных и надежных поставщиков и производителей. Оборудование проверено по допустимым параметрам по местам установки (по рабочим и аварийным режимам). Выполнен выбор оборудования электрической сети ремонтно-механического цеха.

Заключение

Спроектирована система электроснабжения группы цехов трубопрокатного завода. Ключевые технологические процессы изготовления трубопрокатной продукции проводятся в производственных цехах, объединенных в группы по специализации изготовления отдельных элементов конструкции труб и трубопроводов или их сборке, комплектации и испытаниям. Вместе со вспомогательными производственными участками, группы основных производственных цехов образуют цельное крупное предприятие – трубопрокатный завод. Основная часть технологических операций по производству трубопрокатной продукции выполняется энергоемким промышленным электрооборудованием, таким образом, качественное и надежное электроснабжение критически важно для работы завода. Основные производственные электроприемники: различные металлообрабатывающие и прочие станки и технологические линии, сварочное оборудование различного типа, электрические печи, освещение зданий и территории, электроприводы вентиляции, водоснабжения, водоотведения, компрессорных систем и прочих вспомогательных систем.

Выполнен расчет системы электроснабжения группы цехов трубопрокатного завода, согласно рассчитанным электрическим нагрузкам выбрано ее оборудование, отечественного производства от проверенных и надежных поставщиков и производителей. Приняты к установке цеховые КТП с энергоэффективными трансформаторами серии ТМГ33 ХЗК2. Для внутризаводской сети принята смешанная схема, кабельные линии на 10 кВ выполняются кабелем АПвП и на 0,4 кВ кабелем АВБШв. Оборудование проверено по допустимым параметрам по местам установки (по рабочим и аварийным режимам). Выполнен выбор оборудования электрической сети ремонтно-механического цеха.

Реализация электроснабжения группы цехов трубопрокатного завода согласно данному проекту обеспечит их надежную и безопасную работу.

Список используемых источников

1. Ажикова А. К., Шабоянц Н. Г. Естественное и искусственное освещение : учебно-методическое пособие. Астрахань : АГМУ, 2023. 57 с.
2. Бирюлин В. И., Куделина Д. В. Электроснабжение промышленных и гражданских объектов : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 204 с.
3. Голов Р. С. Управление энергосбережением на промышленном предприятии : монография. М. : Дашков и К, 2023. 458 с.
4. Иванов С. Н., Скрипилев А. А. Надежность электроснабжения : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 164 с.
5. Куксин А. В. Электроснабжение промышленных предприятий : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2021. 156 с.
6. Немировский А. Е., Сергиевская И. Ю., Крепышева Л. Ю. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2023. 176 с.
7. Ополева Г. Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов : учебное пособие. М. : Форум, 2022. 416 с.
8. Петухов Р. А., Сизганова Е. Ю., Синенко Л. С. Электроснабжение : учебное пособие. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2022. 328 с.
9. Полуянович Н. К. Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий : учебное пособие для вузов. 8-е изд., стер. СПб. : Лань, 2023. 396 с.
10. Правила устройства электроустановок: действующие разделы 6-го и 7-го изданий. М. : ИНФРА-М, 2023. 832 с.
11. Сибикин Ю. Д., Сибикин М. Ю. Технология энергосбережения : учебник. 4-е изд., перераб. и доп. М. : ИНФРА-М, 2023. 336 с.
12. Сибикин Ю. Д., Сибикин М. Ю. Электроснабжение : учебное пособие. 2-е изд., стер. М. : ИНФРА-М, 2023. 328 с.

13. Сибикин Ю. Д. Современные электрические подстанции : учебное пособие. 2-е изд., доп. М. : ИНФРА-М, 2023. 417 с.

14. Трунова И. Г., Елькин А. Б., Маслеева О. В. Производственное освещение: проектирование и расчёт : учебное пособие. Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. 240 с.

15. Фризен В. Э., Назаров С. Л. Расчет и выбор электрооборудования низковольтных распределительных сетей промышленных предприятий : учебное пособие. 2-е изд., испр. Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2021. 194 с.

16. Хорольский В. Я., Таранов М. А. Эксплуатация систем электроснабжения : учебное пособие. М. : ИНФРА-М, 2025. 288 с.

17. Шеховцов В. П. Расчет и проектирование схем электроснабжения. Методическое пособие для курсового проектирования : учебное пособие. 3-е изд., испр. М. : ИНФРА-М, 2025. 214 с.

18. Шеховцов В. П. Осветительные установки промышленных и гражданских объектов : учебное пособие. М. : ИНФРА-М, 2024. 158 с.

19. Шеховцов В. П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению : учебное пособие. 3-е изд. М. : ИНФРА-М, 2024. 136 с.

20. Щербаков Е. Ф., Александров Д. С., Дубов А.Л. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях : учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М. : ИНФРА-М, 2025. 495 с.