

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 завода производства силовых трансформаторов

Обучающийся

Д.А. Умнихин
(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н. О.В. Самолина

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

Тольятти 2025

Аннотация

Выпускная квалификационная работа 57 страниц, 10 рисунков, 17 таблиц, 20 источников.

Ключевые слова: цех, группа цехов, завод, предприятие, трансформатор, электроснабжение, нагрузка, ток, мощность, надежность, энергоэффективность.

Актуальность темы работы обусловлена необходимостью обеспечения цехов и других зданий планируемого к постройке предприятия – завода производства силовых трансформаторов стабильным и качественным питанием электрической энергией. Без этого данное планируемое к постройке предприятие невозможно ввести в эксплуатацию и наладить производство.

Содержание ВКР включает в себя вопросы: анализ исходных данных по электроснабжению потребителей; разработка системы электроснабжения предприятия; выбор оборудования электрической сети механического цеха, заземление и молниезащита цеха.

Содержание

Введение.....	4
1 Анализ исходных данных по электроснабжению потребителей предприятия	7
1.1 Общая характеристика предприятия.....	7
1.2 Исходные данные на проектирование	8
2 Разработка системы электроснабжения предприятия.....	13
2.1 Расчет электрических нагрузок предприятия	13
2.2 Построение картограммы нагрузок, выбор места расположения ГПП.	17
2.3 Выбор и расчет числа и мощности трансформаторов.....	22
2.4 Выбор схемы внутренней распределительной сети, выбор марок кабелей	32
2.5 Расчет токов короткого замыкания	38
2.6 Выбор основного электрооборудования ГПП и его проверка	42
2.7 Выбор оборудования электрической сети механического цеха, заземление и молниезащита цеха	46
Заключение	54
Список используемой литературы	56

Введение

Силовые трансформаторы (СТ) «играют ключевую роль в системе электроснабжения, обеспечивая передачу и распределение электрической энергии на большие расстояния» [8]. Они служат для изменения напряжения электрического тока, что позволяет эффективно передавать энергию от электростанций к потребителям. Производство силовых трансформаторов – это сложный и высокотехнологичный процесс, который требует применения современных материалов и технологий. Процесс производства силовых трансформаторов начинается с проектирования. На этом этапе инженеры разрабатывают конструкцию трансформатора, учитывая его назначение, мощность и условия эксплуатации. Важными параметрами являются коэффициент трансформации, уровень потерь и эффективность. Для достижения оптимальных характеристик используются различные материалы, такие как электротехническая сталь для сердечников и медь или алюминий для обмоток. После завершения проектирования начинается этап производства. Производство силовых трансформаторов требует не только высококвалифицированного персонала, но и значительных инвестиций в оборудование и технологии. Современные заводы используют автоматизированные линии, что позволяет повысить производительность и качество продукции. Кроме того, внедрение новых технологий, таких как цифровизация и использование искусственного интеллекта, открывает новые горизонты для оптимизации процессов.

Технологические процессы изготовления СТ проводятся в производственных цехах, как правило, объединенных в группы по специализации изготовления отдельных элементов конструкции СТ или их сборке, комплектации и наладке. 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 – завод по производству силовых трансформаторов. 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.

В целом, производство силовых трансформаторов – это сложный и многогранный процесс, который требует сочетания инженерного мастерства, современных технологий и строгого контроля качества. Эти устройства являются основой для надежного и эффективного электроснабжения, что делает их производство важной отраслью в энергетическом секторе.

Этап производства включает в себя несколько ключевых процессов:

- сердечник изготавливается из тонких листов электротехнической стали, которые уменьшают магнитные потери, листы нарезаются, обрабатываются и собираются в пакет, что обеспечивает необходимую магнитную проницаемость;
- обмотки изготавливаются из медных или алюминиевых проводов, могут быть выполнены в виде цилиндрических катушек, которые затем помещаются на сердечник, важно обеспечить надежный контакт между проводами и минимизировать сопротивление;

- сборка, на этом этапе сердечник и обмотки соединяются в единое целое, требуется высокая точности, так как любые отклонения могут привести к снижению эффективности СТ или его поломке;
- для предотвращения коротких замыканий и утечек тока обмотки покрываются изоляционными материалами, это может быть бумага, пропитанная маслом или современные полимерные изоляции.

Почти все технологические операции по производству на предприятиях выполняются энергоемким промышленным электрооборудованием, таким образом, качественное и надежное электроснабжение (ЭСН) критически важно для работы промышленных предприятий. К основным электроприемникам относятся различные металлообрабатывающие и прочие станки и технологические линии, сварочное оборудование различного типа, электрические печи, электроприводы вентиляции, водоснабжения, водоотведения, компрессорных систем и прочих вспомогательных систем, освещения зданий и территории.

Актуальность темы работы обусловлена необходимостью обеспечения цехов и других зданий планируемого к постройке предприятия – завода производства силовых трансформаторов стабильным и качественным питанием электрической энергией. Без этого данное планируемое к постройке предприятие невозможно ввести в эксплуатацию и наладить производство.

Цель работы: разработка качественной и надежной системы электроснабжения предприятия.

Задачи работы:

- провести расчет электрических нагрузок;
- выбрать основное электрооборудование (ЭО) системы электроснабжения (СЭС), провести расчет токов короткого замыкания (КЗ) и проверку ЭО по допустимым параметрам;
- провести выбор ЭО электрической сети, выполнить расчет заземления и молниезащиты механического цеха.

1 Анализ исходных данных по электроснабжению потребителей предприятия

1.1 Общая характеристика предприятия

Заводы по производству силовых трансформаторов играют важную роль в энергетической инфраструктуре, обеспечивая надежное и эффективное преобразование и распределение электрической энергии. Эти предприятия представляют собой высокотехнологичные производственные комплексы, где сочетаются передовые инженерные решения, современные технологии и высококвалифицированный труд. Производственный процесс включает несколько этапов, начиная с проектирования и заканчивая тестированием готовой продукции. Важнейшими этапами являются:

- изготовление сердечников, изготавливаются из тонких листов электротехнической стали, которые уменьшают магнитные потери, процесс требует высокой точности;
- производство обмоток, изготавливаются из медных или алюминиевых проводов, которые затем помещаются на сердечник, качество обмоток напрямую влияет на эффективность трансформатора;
- сборка и изоляция, на этом этапе сердечник и обмотки соединяются, и проводится изоляция, что предотвращает КЗ и утечки тока;
- тестирование, готовые трансформаторы проходят серию тестов, что обеспечивает их надежность и безопасность.

Использование экологически чистых материалов, минимизация отходов и внедрение технологий, снижающих негативное воздействие на окружающую среду, являются важными приоритетами при работе предприятия и разработке его СЭС.

1.2 Исходные данные на проектирование

«Генплан предприятия показан на рисунке 1.

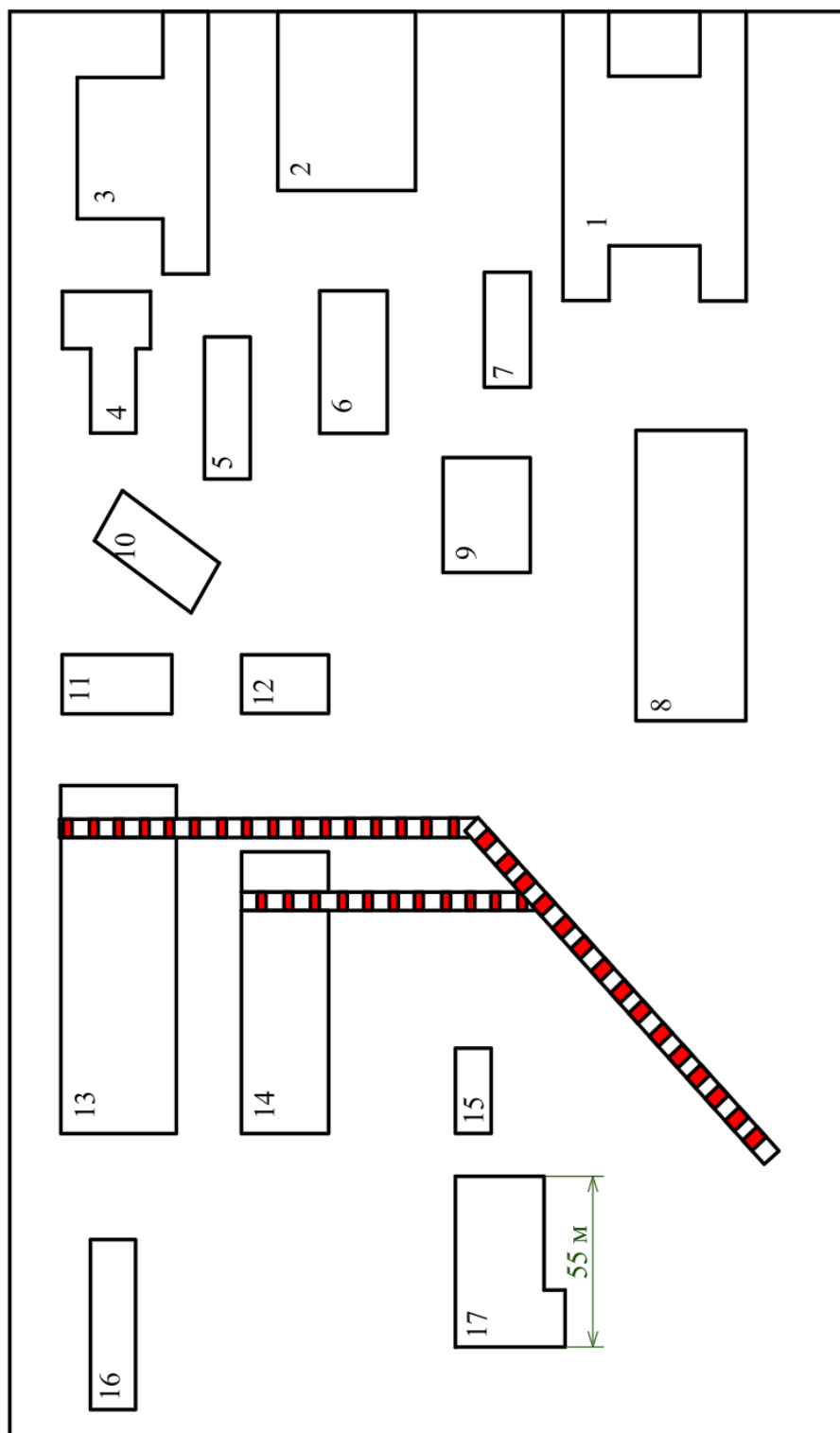


Рисунок 1 – Генплан предприятия

Производственные участки (ПУ), их нагрузки, средневзвешенные коэффициенты мощности и спроса нагрузок приведены в таблице 1» [6].

Таблица 1 – Производственные участки

Участки	Номер на генплане	$\Sigma P_{ном}$, кВт	$\cos\varphi$	K_c
Цех магнитопроводов	1	3900	0,67	0,5
Обмоточный цех №1	2	4050	0,5	0,35
Обмоточный цех №2	3	1930	0,5	0,35
Изоляционный цех	4	2650	0,6	0,5
Испытательный цех	5	282	0,74	0,7
Литейный цех 0,38 кВ	6	318	0,72	0,7
Литейный цех 10 кВ (синхр. двиг.)	6	2000	0,8	0,7
Котельная	7	372	0,8	0,6
Гараж	8	139	0,88	0,25
Корпусный цех	9	744	0,7	0,25
АБК	10	468	0,62	0,65
Ремонтный цех	11	168	0,69	0,25
Сборочный цех №1	12	3475	0,65	0,35
Сборочный цех №2	13	3380	0,65	0,35
Хранилище	14	58	0,84	0,25
Механический цех	15	85,3	0,87	0,75
Компрессорная	16	3570	0,75	0,55
Хозблок	17	295	0,84	0,4

«Источник питания ГПП – подстанция (ПС) энергосистемы, ГПП будет питаться по ВЛ 110 кВ с проводами АС-70/11. Категории надежности электроснабжения участков приведены в таблице 2» [3].

Таблица 2 – Требования к надёжности электроснабжения ПУ

Участки	Категория
Цех магнитопроводов	2
Обмоточный цех №1	2
Обмоточный цех №2	2
Изоляционный цех	2
Испытательный цех	1
Литейный цех 0,38 кВ	1
Литейный цех 10 кВ (синхр. двиг.)	1
Котельная	1
Гараж	3
Корпусный цех	1
АБК	2
Ремонтный цех	3
Сборочный цех №1	2
Сборочный цех №2	2
Хранилище	3
Механический цех	2
Компрессорная	1
Хозблок	3

Всего на территории предприятия будет размещаться 17 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 – завод по производству силовых трансформаторов. Данное предприятие представляет собой огороженную железобетонным забором территорию, на которой расположены все производственные участки. В целом предприятие относится к первой категории надежности электроснабжения, что обусловлено остановкой основного технологического процесса, массовым браком сырья и продукции в случае перерывов ЭСН [10].

Также будет проводиться выбор ЭО электрической сети механического цеха (МЦ), выполняться расчет заземления и молниезащиты данного цеха.

Механический цех играет важную роль в обеспечении эффективной работы предприятия. Этот цех отвечает за изготовление, обработку и «сборку различных металлических элементов и деталей конструкции силовых трансформаторов. Дополнительной задачей механического цеха является производство деталей и узлов, которые используются в различных машинах и устройствах самого предприятия» [6]. Это может включать в себя:

- обработку различных металлов и сплавов, таких как сталь, алюминий и медь, процессы обработки могут включать токарные, фрезерные, сверлильные и шлифовальные работы;
- изготовление деталей по чертежам, специалисты механического цеха работают с технической документацией, создавая детали в соответствии с заданными параметрами и стандартами;
- ремонт и обслуживание оборудования, цех часто занимается ремонтом и техническим обслуживанием производственного оборудования, что позволяет поддерживать его в рабочем состоянии и предотвращать простои.

Высококачественные детали и узлы, произведенные в механическом цехе, являются основой для надежной работы конечной продукции. Возможность быстрого изготовления и замены деталей позволяет предприятию адаптироваться к изменяющимся условиям рынка и требованиям клиентов.

План МЦ с расположением оборудования показан на рисунке 2.

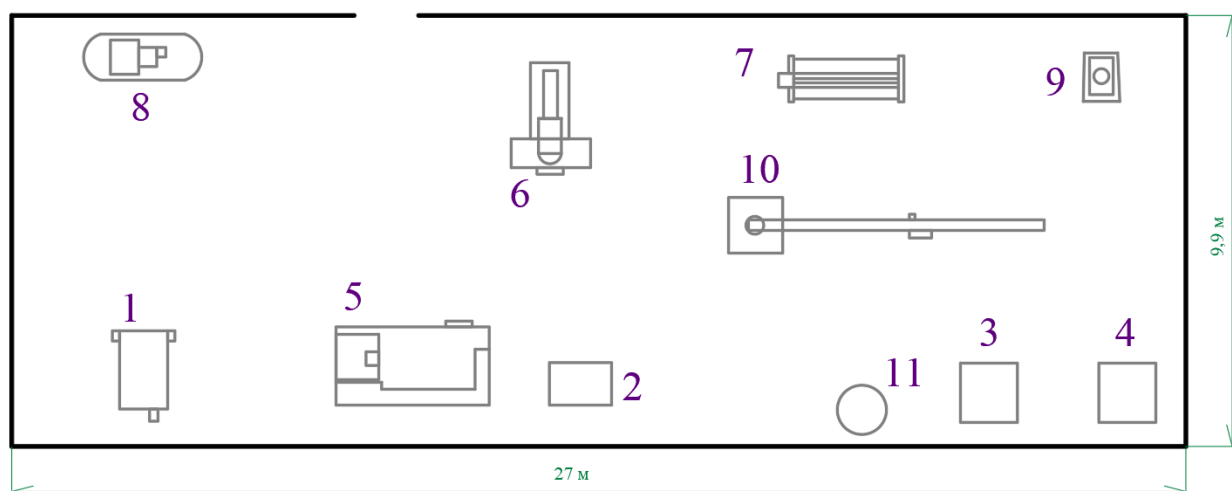


Рисунок 2 – План механического цеха

Перечень электрооборудования МЦ приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Перечень электрооборудования МЦ

Наименование	№ на плане	Руст, кВт
Полуавтомат сварочный, ПВ=40%	1	10,5
Многофункциональный станок	2	3,2
Электродпечь	3	10,5
Электродпечь	4	10,5
Токарный станок	5	5
Фрезерный станок	6	5,2
Ножницы электрические	7	5,8
Компрессор	8	9
Пресс	9	14

Вывод. Выполнен анализ исходных данных по электроснабжению потребителей. Систематизированы электрические нагрузки по предприятию и механическому цеху. Предприятие представляет собой огороженную железобетонным забором территорию с цехами и другими зданиями.

2 Разработка системы электроснабжения предприятия

2.1 Расчет электрических нагрузок предприятия

Для выбора оборудования СЭС вначале требуется определить ее электрические нагрузки, согласно которым далее по допустимым паспортным техническим параметрам выбираются и проверяются марки электрооборудования.

«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» [7].

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

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

Участок №1, по (1-3):

$$P_c = 0,5 \cdot 3900 = 1950 \text{ кВт},$$

$$Q_c = 1950 \cdot 1,11 = 2160,6 \text{ квар},$$

$$S_c = \sqrt{1950^2 + 2160,6^2} = 2910,45 \text{ кВА}.$$

Результаты расчетов сведены в таблице 4.

Таблица 4 – Нагрузки предприятия

Цеха	$\Sigma P_{ном}$, кВт	tgφ	Kc	Среднесменные нагрузки		
				Pc, кВт	Qc, квар	Sc, кВА
Цех магнитопроводов	3900	1,11	0,5	1950	2160,60	2910,45
Обмоточный цех №1	4050	1,73	0,35	1417,5	2455,18	2835,00
Обмоточный цех №2	1930	1,73	0,35	675,5	1170,00	1351,00
Изоляционный цех	2650	1,33	0,5	1325	1766,67	2208,33
Испытательный цех	282	0,91	0,7	197,4	179,42	266,76
Литейный цех 0,38 кВ	318	0,96	0,7	222,6	214,55	309,17
Литейный цех 10 кВ (синхр. двиг.)	2000	0,75	0,7	1400	0,00	1400,00
Котельная	372	0,75	0,6	223,2	167,40	279,00
Гараж	139	0,54	0,25	34,75	18,76	39,49
Корпусный цех	744	1,02	0,25	186	189,76	265,71
АБК	468	1,27	0,65	304,2	384,96	490,65
Ремонтный цех	168	1,05	0,25	42	44,06	60,87
Сборочный цех №1	3475	1,17	0,35	1216,25	1421,95	1871,15
Сборочный цех №2	3380	1,17	0,35	1183	1383,08	1820,00
Хранилище	58	0,65	0,25	14,5	9,37	17,26
Механический цех	85,3	0,57	0,35	71,75	40,66	82,47
Компрессорная	3570	0,88	0,55	1963,5	1731,64	2618,00
Хозблок	295	0,65	0,4	118	76,22	140,48
Итого	-	-	-	12545,15	13414,29	18366,38

«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, м^2 .

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

Освещение обеспечивается современными светодиодными светильниками» [17].

«Светодиодное освещение (СДО) – это технология, которая стремительно завоевывает популярность в различных областях благодаря своим уникальным характеристикам и преимуществам. Светодиоды (LED) представляют собой полупроводниковые устройства, которые преобразуют электрический ток в свет, что делает их одними из самых энергоэффективных источников света. СДО обладает рядом значительных преимуществ по сравнению с традиционными источниками света, такими как лампы накаливания и люминесцентные лампы:

- высокая энергоэффективность – светодиоды потребляют значительно меньше электроэнергии для выработки того же количества света, что позволяет существенно снизить затраты на электроэнергию;
- долговечность – срок службы светодиодов намного дольше, чем у традиционных ламп, что снижает частоту замены и связанные с этим затраты;
- экологичность – светодиоды не содержат токсичных веществ, таких как ртуть, что делает их безопасными для окружающей среды и упрощает утилизацию;
- малый размер и разнообразие форм – благодаря компактным размерам и разнообразию форм светодиоды могут быть использованы в самых разных приложениях, от общего освещения до декоративного и архитектурного» [11].

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

$$P_{po} = 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95 \cdot 16380 = 59,13 \text{ кВт},$$

$$Q_{po} = 59,13 \cdot 0,33 = 19,51 \text{ квар.}$$

Итого нагрузки ПУ №1:

$$P_p' = 1950 + 59,13 = 2009,13 \text{ кВт},$$

$$Q_p' = 2160,6 + 19,51 = 2180,12 \text{ квар},$$

$$S_p' = \sqrt{2009,13^2 + 2180,12^2} = 2964,71 \text{ кВА.}$$

Расчетные нагрузки сведены в таблице 5» [8].

Таблица 5 – Расчетные нагрузки предприятия

Участки	Рр', кВт	Qp', квар	Sp', кВА
Цех магнитопроводов	2009,13	2180,12	2964,71
Обмоточный цех №1	1451,61	2466,44	2861,91
Обмоточный цех №2	705,68	1179,96	1374,88
Изоляционный цех	1336,37	1770,42	2218,17
Испытательный цех	206,47	182,42	275,51
Литейный цех 0,38 кВ	232,94	217,97	319,02
Литейный цех 10 кВ (синхр. двиг.)	1400	0	1400
Котельная	229,34	169,43	285,14
Гараж	79,86	33,64	86,65
Корпусный цех	197,02	193,40	276,08
АБК	312,73	387,78	498,17
Ремонтный цех	49,96	46,68	68,38
Сборочный цех №1	1222,83	1424,13	1877,09
Сборочный цех №2	1239,86	1401,84	1871,47
Хранилище	27,08	13,52	30,26
Механический цех	66,56	37,11	76,21
Компрессорная	1974,30	1735,21	2628,46
Хозблок	136,02	82,17	158,91
Итого по участкам	12903,57	13729,70	18841,62
Территория	82,83	27,34	87,23
Итого	12986,41	13757,04	18918,32

«Для выбора места установки ГПП, согласно результатам расчетов нагрузок, строится картограмма нагрузок» [12].

2.2 Построение картограммы нагрузок, выбор места расположения ГПП

«Картограмма электрических нагрузок (КЭН) предприятия – это графическое представление распределения электрических нагрузок на территории предприятия» [6]. Она служит важным инструментом для планирования и управления электроснабжением, позволяя оптимизировать использование электроэнергии и минимизировать потери. Интерпретация картограммы электрических нагрузок позволяет сделать выводы о текущем состоянии электроснабжения предприятия и разработать планы по его улучшению:

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

Картограмма электрических нагрузок предприятия 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» [6].

«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» [6].

Расчет координат ЦЭН приведен в таблице 6.

Таблица 6 – Расчет координат ЦЭН

Участки	X _i , м	Y _i , м	Sp, кВА	Sp·X _i , кВА	Sp·Y _i , кВА
Цех магнитопроводов	758	86	2964,7	2247548	256196
Обмоточный цех №1	793	299	2861,9	2268777	856426
Обмоточный цех №2	769	435	1374,9	1056734	597661
Изоляционный цех	636	460	2218,2	1411421	1020136
Испытательный цех	606	378	275,5	166918	104143
Литейный цех 0,38 кВ	635	292	319,0	202655	93121
Литейный цех 10 кВ (синхр. двиг.)	635	292	1400,0	889350	408660
Котельная	653	187	285,1	186223	53292
Гараж	506	63	86,7	43855	5477
Корпусный цех	540	202	276,1	149000	55658
АБК	523	424	498,2	260491	211322
Ремонтный цех	439	455	68,4	30011	31088
Сборочный цех №1	439	336	1877,1	823854	630701
Сборочный цех №2	273	452	1871,5	510912	844970
Хранилище	252	336	30,3	7627	10169
Механический цех	226	188	76,21	23441	19516
Компрессорная	50	459	2628,5	131095	1206071
Хозблок	87	182	158,9	13866	28866
Итого			18918	10423777	6433472
Координаты ЦЭН	X, м	Y, м	-	-	-
	551	310	-	-	-

Для ПУ №1, по (6,7):

$$R = \sqrt{\frac{2964,7}{0,5 \cdot 3,14}} = 43,46 \text{ м,}$$

$$\alpha = 360 \cdot 78,8 / 2964,7 = 9,6^{\circ}.$$

Расчеты сведены в таблице 7.

Таблица 7 – Расчет картограммы нагрузок

Участки	R, м	α	Soc, кВА
Цех магнитопроводов	43,46	9,6	78,8
Обмоточный цех №1	42,70	5,7	45,5
Обмоточный цех №2	29,59	10,5	40,2
Изоляционный цех	37,59	2,5	15,2
Испытательный цех	13,25	15,8	12,1
Литейный цех 0,38 кВ	14,25	15,6	13,8
Литейный цех 10 кВ (синхр. двиг.)	29,86	0,0	0,0
Котельная	13,48	10,3	8,2
Гараж	7,43	249,9	60,1
Корпусный цех	13,26	19,2	14,7
АБК	17,81	8,2	11,4
Ремонтный цех	6,60	55,9	10,6
Сборочный цех №1	34,58	1,7	8,8
Сборочный цех №2	34,53	14,6	75,8
Хранилище	4,39	199,5	16,8
Механический цех	6,97	16,3	3,4
Компрессорная	40,92	2,0	14,4
Хозблок	10,06	54,4	24,0

«Картограмма нагрузок – на рисунке 3.

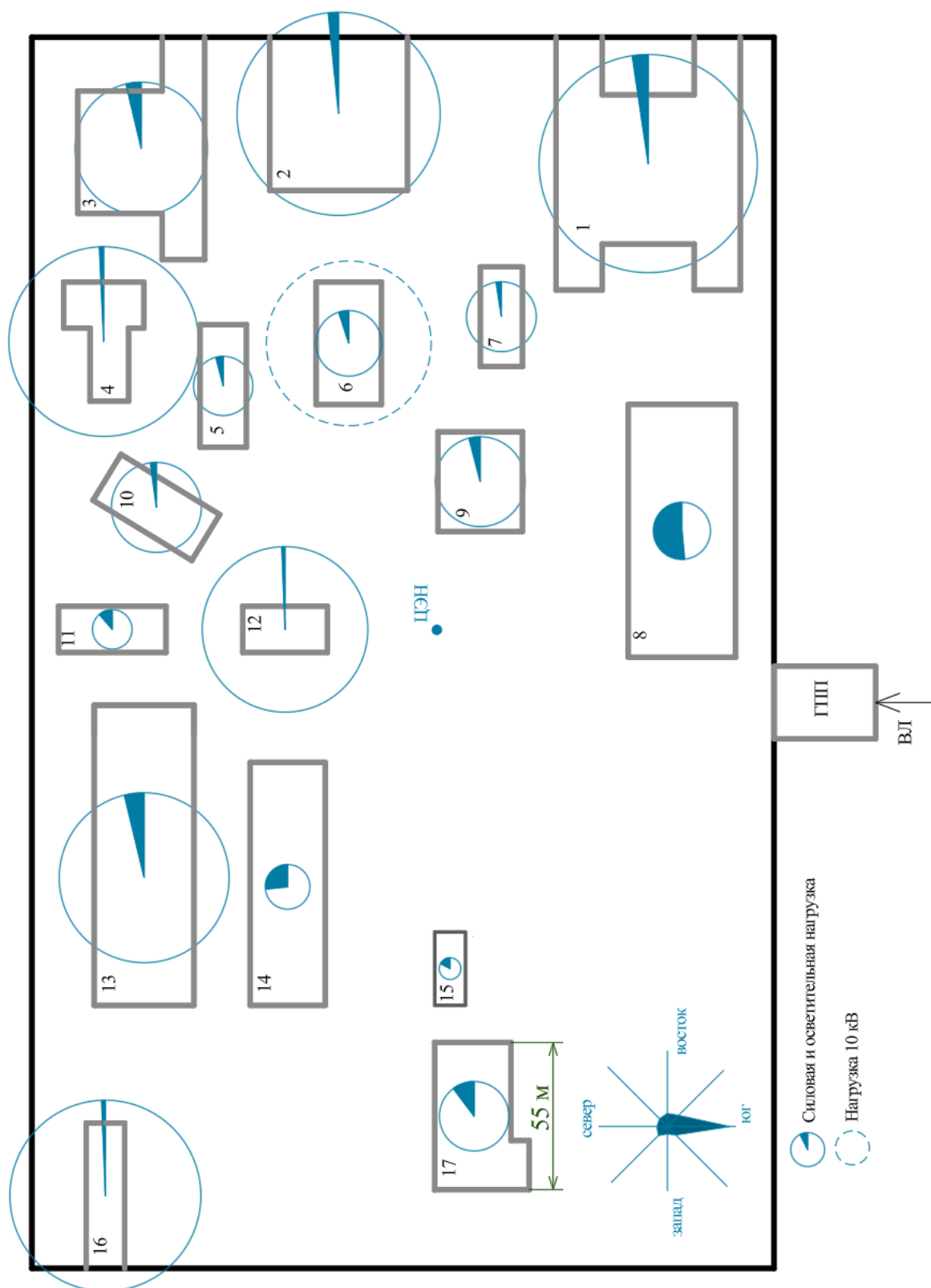


Рисунок 3 – Картограмма нагрузок

С учетом розы ветров и расположения источника питания, ГПП выносится за территорию» [6].

2.3 Выбор и расчет числа и мощности трансформаторов

Выбор силовых трансформаторов для цеховых подстанций – это сложный и ответственный процесс, требующий учета множества факторов. От правильного выбора трансформаторов зависит надежность и эффективность работы всего производственного процесса. Силовые трансформаторы делятся на несколько типов в зависимости от их конструкции и назначения:

- масляные трансформаторы, наиболее распространенные, используются для преобразования высокого напряжения в низкое, масло служит как охлаждающей жидкостью, так и изолирующей средой;
- сухие трансформаторы, используются в условиях, где требуется повышенная пожарная безопасность, не содержат масла и охлаждаются воздухом;
- специальные трансформаторы, предназначены для специальных применений, таких как высокочастотные или импульсные нагрузки.

При выборе трансформаторов для цеховой подстанции необходимо учитывать несколько ключевых критериев:

- должны обладать достаточной мощностью для удовлетворения потребностей цеха;
- должны соответствовать напряжению в сети и потребностям потребителей;
- условия эксплуатации, температура, влажность, наличие агрессивных сред и другие факторы, влияющие на долговечность трансформатора;
- стоимость, цена трансформатора и его эксплуатации, включая затраты на обслуживание и замену.

«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» [19]:

$$Q_{HH} = Q_p - Q_{БК} \quad (12)$$

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

$$S_o = \frac{2964,71}{0,7 \cdot 2} = 2118 \text{ кВА}$$

Устанавливается два энергоэффективных трансформатора ТМГ12-2500/10» [1].

Энергоэффективные силовые трансформаторы – это устройства, предназначенные для преобразования электрической энергии с минимальными потерями. Они играют ключевую роль в энергосистемах, обеспечивая экономию электроэнергии и снижение эксплуатационных затрат. Данные СТ обладают рядом значительных преимуществ по сравнению с традиционными моделями:

- имеют меньшие потери на вихревые токи и гистерезис, что позволяет экономить электроэнергию;
- благодаря меньшим потерям и лучшей теплоизоляции, такие трансформаторы служат дольше;
- экономия электроэнергии и увеличение срока службы приводят к снижению общих затрат на эксплуатацию;
- меньшие потери энергии означают меньшее воздействие на окружающую среду и снижение выбросов углекислого газа.

Энергоэффективные трансформаторы основаны на нескольких ключевых принципах:

- применение высококачественной электротехнической стали и специальных покрытий для сердечников и обмоток;
- оптимизация конструкции – улучшенная геометрия сердечника и обмоток для минимизации потерь на вихревые токи и гистерезис;
- использование масляного или воздушного охлаждения с улучшенными теплообменниками для эффективного отвода тепла;
- интеграция систем мониторинга и управления для оптимизации работы трансформатора.

Внешний вид ТМГ12 показан на рисунке 4.



Рисунок 4 – Трансформатор ТМГ12

Выбор трансформаторов цеховых ТП сведен в таблице 8.

Таблица 8 – Выбор трансформаторов ТП

Подстанции	Зона охвата, № цехов	So, кВА	St, кВА (ТМГ12)
ТП-1	1	2118	2500
ТП-2	2	2044	

Продолжение таблицы 8

Подстанции	Зона охвата, № цехов	So, кВА	St, кВА (ТМГ12)
ТП-3	3	982	1000
ТП-4	4	1584	1600
ТП-5	5	197	250
ТП-6	6	228	
ТП-7	7,8	204	
ТП-8	9	197	
ТП-9	10	356	400
ТП-10	11 ,12	1389	1600
ТП-11	13, 14	1357	
ТП-12	16, 17, 15, освещ. терр.	2100	2500

«Расчет КРМ на ТП-1, по (10,11):

$$Q_1 = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 2500)^2 - 2009,13^2} = 2866 \text{ квар},$$

$$Q_{0,4} = 2180,12 - 2866 = -686 \text{ квар}.$$

КРМ не требуется. Коэффициент загрузки трансформатора в послеаварийном режиме:

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

$$K_n = \frac{2965}{2500} = 1,19 \leq 1,4.$$

Расчет КРМ на ТП и проверка трансформаторов по перегрузке приведены в таблице 9» [5].

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

Подстанции	$Q_{0,4}$, квар	K_{Π}
ТП-1	-686	1,19
ТП-2	-718	1,14
ТП-3	-29	1,37
ТП-4	-27	1,39
ТП-5	-100	1,10
ТП-6	-43	1,28
ТП-7	-95	1,14
ТП-8	-96	1,10
ТП-9	-77	1,25
ТП-10	-372	1,22
ТП-11	-432	1,19
ТП-12	-791	1,18

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

Комплектные трансформаторные подстанции (КТП) – это готовые к эксплуатации комплексы электрооборудования, предназначенные для приема, преобразования и распределения электрической энергии. Они используются в различных отраслях промышленности, коммунальном хозяйстве и строительстве для обеспечения стабильного и надежного электроснабжения объектов. КТП состоят из нескольких основных компонентов:

- трансформаторы – основной элемент подстанции, который преобразует напряжение с одного уровня на другой;
- распределительное устройство – обеспечивает распределение электроэнергии по различным участкам и объектам, включает в себя коммутационные аппараты, защитные устройства и измерительные приборы;

- система управления и защиты – автоматические системы, которые контролируют работу подстанции, защищают оборудование от перегрузок и коротких замыканий, а также обеспечивают безопасность персонала» [13];
- корпус или рама – обеспечивает защиту оборудования от внешних воздействий и облегчает монтаж и транспортировку подстанции.

Использование КТП имеет ряд преимуществ:

- мобильность и удобство монтажа, легко устанавливаются и могут быть быстро введены в эксплуатацию;
- надежность и безопасность;
- использование КТП позволяет снизить затраты на строительство и эксплуатацию распределительных подстанций.

«Компенсация реактивной мощности (КРМ) будет производиться централизованно на шинах 10 кВ ГПП» [4].

«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, %» [6].

Для ТП-1, по (14,15):

$$\Delta P_m = \frac{22,5}{2} \cdot \frac{2009,1^2 + 2180,1^2}{2500^2} + 2 \cdot 2,3 = 20,42 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_m = \frac{5,5}{2 \cdot 100} \cdot \frac{2009,1^2 + 2180,1^2}{2500^2} + \frac{2 \cdot 0,5}{100} \cdot 2500 = 121,68 \text{ квар}.$$

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	20,42	121,68	2029,55	2301,80
ТП-2	19,34	115,10	1470,96	2581,54
ТП-3	12,12	63,98	717,81	1243,94
ТП-4	18,78	108,26	1355,15	1878,67
ТП-5	2,82	11,33	209,30	193,75
ТП-6	3,50	13,66	236,44	231,63
ТП-7	2,96	11,82	232,31	181,24
ТП-8	2,83	11,36	199,85	204,76
ТП-9	4,83	20,36	317,56	408,14
ТП-10	15,22	86,94	1288,02	1557,75
ТП-11	14,68	83,66	1281,61	1499,02
ТП-12	20,17	120,12	2279,88	2001,94
РУ-1	-	-	1400	1452,63
Итого	137,67	768,26	13098,28	14505,04

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

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

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 $\text{tg}\varphi=0,33$.

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

где α_m – допустимая перегрузка СД;

P_n – номинальная активная мощность СД, кВт;

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

η_n – КПД двигателя, о.е.» [6].

$$\Delta Q_m = \frac{10,5}{2 \cdot 100} \cdot \frac{13098,28^2 + 14505,04^2}{10000^2} + \frac{2 \cdot 0,7}{100} \cdot 10000 = 2115,88 \text{ квар},$$

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

$$Q_{\text{ку}} / 2 = \frac{14505,04 + 2115,88 - 0,33 \cdot 12960,61 - 1452,63}{2} = 10891,3 \text{ квар}.$$

Устанавливается две конденсаторные батареи УККРМ-10,5-5500 по 5500 квар. «Автоматическая компенсация реактивной мощности (АРКМ) – это система, предназначенная для оптимизации работы электрических сетей путем поддержания оптимального баланса между активной и реактивной мощностью. Она играет ключевую роль в повышении эффективности и надежности электроснабжения, снижая потери энергии и улучшая качество электроэнергии. АРКМ является важным инструментом для повышения эффективности и надёжности электрических систем» [4]. Она позволяет:

- снизить потери энергии – реактивная мощность не выполняет полезной работы, но вызывает дополнительные токи в сети, что приводит к потерям энергии, АРКМ помогает минимизировать эти потери;
- улучшить качество электроэнергии, АРКМ стабилизирует напряжение в сети;
- повысить надёжность работы системы – снижение реактивной мощности уменьшает нагрузку на оборудование, что снижает риск аварий и продлевает срок службы.

АРКМ работает на основе следующих принципов:

- мониторинг параметров сети – система постоянно контролирует уровень реактивной мощности в сети;
- при обнаружении дисбаланса между активной и реактивной мощностью, АРКМ вносит корректировки, добавляя или компенсируя реактивную мощность;
- автоматическое управление.

«Реактивная нагрузка ГПП после КРМ:

$$Q_{pk} = 14505,04 - 2 \cdot 5500 = 3505,04 \text{ квар},$$

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.

$$S_p = \sqrt{(0,9 \cdot 13098,28)^2 + (0,9 \cdot 3505,04)^2} = 12203,23 \text{ кВА}$$

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



Рисунок 5 – Трансформатор ТДН-10000/110

Послеаварийная перегрузка, по (13):

$$K_n = \frac{12203,23}{10000} = 1,22 < 1,4$$

Перегрузка не превысит предельно допустимую» [6].

2.4 Выбор схемы внутренней распределительной сети, выбор марок кабелей

«Выбор схемы внутренней распределительной сети (РС) на предприятии является важным этапом проектирования системы электроснабжения. При выборе схемы необходимо учитывать расположение цехов, кабинетов, категорию потребителей электроэнергии по надёжности, режимы работы оборудования и перспективы развития объекта. Существуют три основных вида распределительных сетей: магистральная, радиальная и смешанная.

Смешанная сеть представляет собой комбинацию магистральных и радиальных схем, она позволяет использовать их преимущества и оптимизировать систему электроснабжения» [7].

«Для распределительной сети выбирается смешанная схема, как обеспечивающая наилучшие технико-эксплуатационные показатели при минимальных капиталовложениях. Кабельные линии на 10 кВ выполняются кабелем АПвБП и на 0,4 кВ кабелем АВБШв. Кабели прокладываются в траншеях под землей» [16]. План трасс КЛ – на рисунке 6.

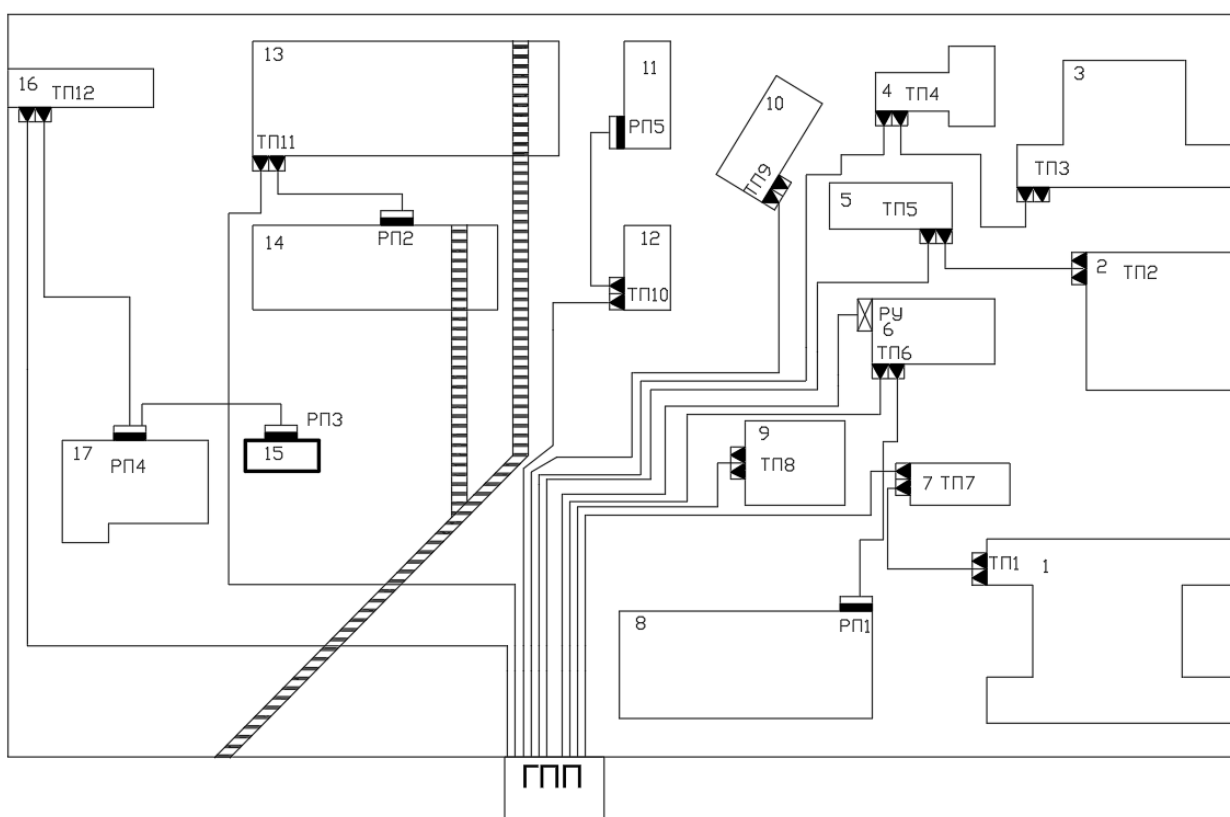


Рисунок 6 – План трасс кабельных линий

Далее выбираются марки кабелей.

Расчет для КЛ до ТП-4.

«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» [12].

$$I_p = \frac{3752,6}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 2} = 108,3 \text{ А},$$

$$I_{\text{ав}} = \frac{3752,6}{\sqrt{3} \cdot 10} = 216,7 \text{ А},$$

$$F_{\text{эк}} = \frac{108,3}{1,4} = 77 \text{ мм}^2.$$

С поправкой на аварийный ток выбирается кабель АПвП 3×120 мм²,
 $I_{\text{доп}} = 204 \text{ А}$ [18].

«Кабели марки АПвП – это силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, предназначенные для передачи и распределения электрической энергии. Они используются в различных отраслях промышленности, коммунальном хозяйстве и строительстве для обеспечения надежного и безопасного электроснабжения объектов» [7]. Кабели состоят из нескольких основных компонентов:

- жилы – проводники, по которым передается электрическая энергия, изготавливаются из меди или алюминия;

- изоляция – слой сшитого полиэтилена, который обеспечивает надежную защиту жил от внешних воздействий и предотвращает утечки тока;
- экран – металлический слой, который защищает кабель от внешних электромагнитных полей и предотвращает излучение электромагнитных волн;
- оболочка – внешняя защитная оболочка, «обычно изготовленная из полиэтилена или ПВХ, которая защищает кабель от механических повреждений и воздействия окружающей среды.

Использование кабелей АПвП имеет ряд преимуществ:

- надежность и долговечность – сшитый полиэтилен обладает высокой стойкостью к воздействию тепла, влаги и химических веществ, что обеспечивает длительный срок службы кабелей» [7];
- гибкость и удобство монтажа;
- устойчивость к внешним воздействиям;
- повышенная устойчивость к электромагнитным помехам.

Выбор кабелей 10 кВ сведен в таблице 11.

Таблица 11 – Выбор кабелей 10 кВ

Участок	I_p , А	$I_{ав}$, А	сечение жил, мм ²	$I_{доп}$, А
ГПП--ТП-4	108,3	216,7	120	204
ГПП--ТП-5	94,0	188,0	120	204
ГПП--ТП-6	9,6	19,1	16	64
ГПП--ТП-7	97,1	194,2	120	204
ГПП--ТП-8	8,3	16,5	16	64
ГПП--ТП-9	14,9	29,9		
ГПП--ТП-10	58,3	116,7	50	119

Продолжение таблицы 11

Участок	I_p , А	$I_{ав}$, А	сечение жил, мм ²	$I_{доп}$, А
ГПП--ТП-11	56,9	113,9	50	119
ГПП--ТП-12	87,6	175,2	150	234
ТП7-ТП1	88,6	177,2	120	204
ТП5-ТП2	85,8	171,5	95	174
ТП4-ТП3	41,5	82,9	25	77
ГПП--РУ-1	58,2	116,5	50	119

«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.

Согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ), потери напряжения не должны превышать 5 %» [3].

Для КЛ до ТП-4:

$$\Delta U_{\text{л}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 216,7 \cdot 0,581 \cdot 100}{10000} (0,26 \cdot 0,878 + 0,08 \cdot 0,65) = 0,38 \% < 5 \%$$

Остальные КЛ проверяются аналогично.

Проверка КЛ 10 кВ сведена в таблице 12.

Таблица 12 – Проверка КЛ 10 кВ

Участок	$F_{ст}, \text{мм}^2$	$r_0, \text{Ом/км}$	$x_0, \text{Ом/км}$	$\Delta U, \%$
ГПП--ТП-4	120	0,26	0,08	0,38
ГПП--ТП-5				0,90
ГПП--ТП-6	16	1,95	0,11	0,51
ГПП--ТП-7	120	0,26	0,08	0,58
ГПП--ТП-8	16	1,95	0,11	0,29
ГПП--ТП-9				0,93
ГПП--ТП-10	50	0,63	0,09	0,73
ГПП--ТП-11	50	0,63	0,09	1,33
ГПП--ТП-12	150	0,206	0,08	0,84
ТП7-ТП1	120	0,26	0,08	0,18
ТП5-ТП2	95	0,326	0,09	0,19
ТП4-ТП3	25	1,24	0,1	0,58
ГПП--РУ-1	50	0,63	0,09	1,08

Выбор кабелей и проверка линий 0,4 кВ аналогичны, результаты сведены в таблице 13.

Таблица 13 – Выбор кабелей 0,4 кВ

Участок	$I_p, \text{А}$	Сечение АВБШв, мм^2	$I_{доп}, \text{А}$	$\Delta U, \%$
ТП6-РП1	125,1	4x35	145	1,29
ТП11-РП2	43,7	4x6	55	1,58
ТП12-РП4	339,4	4x185	380	1,34
РП4-РП3	110,0	4x25	125	1,48
ТП10-РП5	98,7			1,49

Для выбора электрооборудования ГПП определяются токи КЗ.

2.5 Расчет токов короткого замыкания

«Расчёт токов КЗ в сети предприятия играет важную роль в обеспечении безопасности и надёжности работы электрической системы, он проводится с целью подбора аппаратуры, проверки электрической установки на термическую и электродинамическую устойчивость» [6].

«Схема электрической сети и схема замещения показаны на рисунке 7.

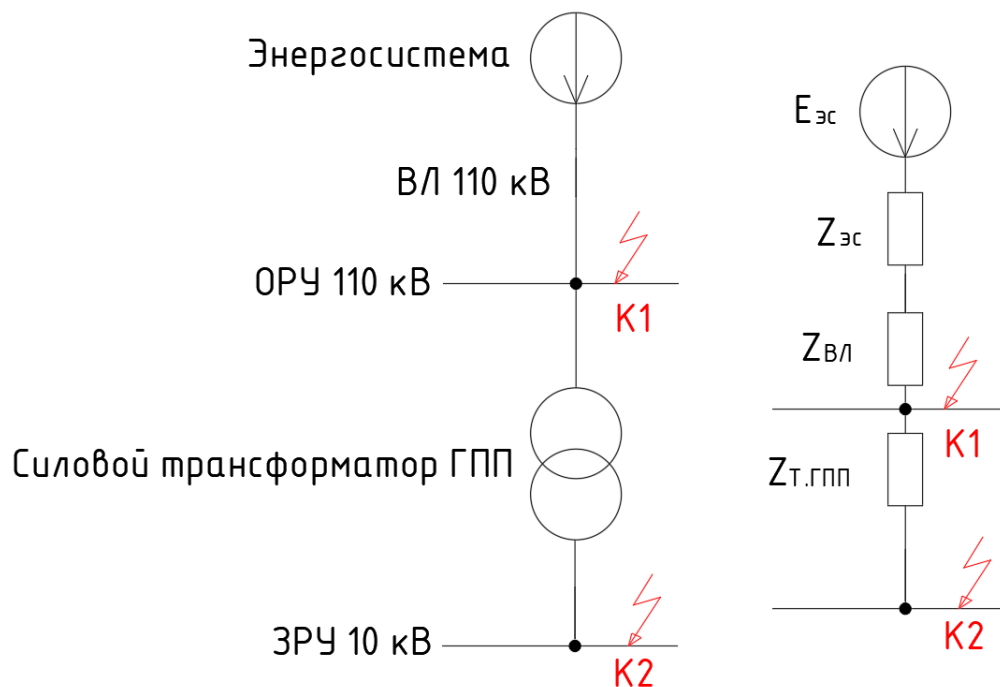


Рисунок 7 – Схема электрической сети и схема замещения

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:

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

где ΔP_κ – потери КЗ, кВт;

$U_{н.в.}$ – напряжение ВН, кВ;

S_n – номинальная мощность, кВА.

$$Z_m = \Delta U_\kappa / 100 \cdot 10^2 / S_n, \quad (25)$$

где ΔU_κ – потери напряжения КЗ, %» [6].

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

«Токи трехфазного и двухфазного КЗ:

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

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

Ударный ток КЗ:

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

где κ_y – ударный коэффициент.

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

где T_a – постоянная апериодической слагающей, с» [6].

$$T_a = \sum X / 314 \sum R \quad (31)$$

«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.

$$X_c = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 8,711} = 7622 \text{ мОм.}$$

Сопротивления трансформаторов ГПП, по (24-26):

$$R_m = \frac{60000 \cdot 115^2}{10000^2} \cdot (10,5 / 115)^2 = 122 \text{ мОм,}$$

$$Z_m = \frac{10,5 \cdot 115^2}{100 \cdot 10^2} \cdot (10,5 / 115)^2 = 1838 \text{ мОм,}$$

$$X_m = \sqrt{1838^2 - 122^2} = 1833 \text{ мОм.}$$

Сопротивления ВЛ 110 кВ:

$$R_{\text{вл}} = 0,429 \cdot 8,7 \cdot \left(\frac{10,5}{115}\right)^2 = 15,6 \text{ мОм,}$$

$$X_{\text{вл}} = 0,444 \cdot 8,7 \cdot \left(\frac{10,5}{115}\right)^2 = 16,1 \text{ мОм.}$$

Эквивалентные сопротивления цепи КЗ:

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

$$\Sigma r = 15,6 + 122 = 138 \text{ мОм,}$$

$$\Sigma x = X_C + X_{BL} + X_{m.ГПП}, \quad (34)$$

$$\Sigma x = 7622 + 16,1 + 1833 = 9472 \text{ мОм},$$

$$z = \sqrt{138^2 + 9472^2} = 9473 \text{ мОм}.$$

По формулам (27–31):

$$I'' = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 9473} = 7,009 \text{ кА},$$

$$I_{кз}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 7,009 = 6,07 \text{ кА},$$

$$T_a = 9472 / (314 \cdot 138) = 0,2189,$$

$$\kappa_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,2189}} = 1,955,$$

$$I_y = 7,009 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1,955 - 1)^2} = 11,782 \text{ кА}.$$

Для точки К1 расчет аналогичен» [6]. Результаты расчетов сведены в таблице 14.

Таблица 14 – Результаты расчетов токов КЗ

Точки КЗ	$I_{к}^{(3)}, \text{ кА}$	$I_y, \text{ кА}$	$I_{к}^{(2)}, \text{ кА}$
К1	8,693	14,992	7,528
К2	7,009	11,782	6,070

«Согласно данным результатам расчетов выбирается электрооборудование ГПП. ЭО проверяется по допустимым параметрам по местам установки» [6].

2.6 Выбор основного электрооборудования ГПП и его проверка

«Высоковольтные выключатели (ВВ) – это устройства, предназначенные для оперативного отключения и включения высоковольтных электрических цепей при нормальных и аварийных режимах работы» [20]. Они играют ключевую роль в обеспечении безопасности и надежности работы энергосистем, предотвращая повреждение оборудования и возможные аварии. Высоковольтные выключатели классифицируются по нескольким признакам, включая тип дугогасящей среды и конструктивное исполнение. Масляные выключатели используют масло в качестве дугогасящей среды. Маломасляные ВВ содержат небольшое количество масла, которое используется исключительно для гашения дуги, баковые ВВ имеют больший объем масла, который также служит для изоляции контактов. Воздушные выключатели используют сжатый воздух для гашения дуги. Они обладают высокой скоростью срабатывания и могут использоваться в условиях частых коммутаций. Вакуумные выключатели используют вакуум в качестве дугогасящей среды. Они отличаются высокой надежностью и долговечностью, так как вакуум препятствует образованию дуги. Элегазовые выключатели используют шестифтористую серу (SF_6) в качестве дугогасящей среды. Они обладают высокой эффективностью и экологичностью, так как SF_6 является отличным изолятором и не выделяет токсичных веществ.

«Условия выбора выключателей:

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

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

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

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

$I_{\text{к}}$ – ток трехфазного КЗ, кА.

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

где $i_{np.c}$ – 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» [20]:

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

$$I_{н.анн.} \geq I_{раб. max.}, \quad (41)$$

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

$$i_{дин} \geq i_y. \quad (43)$$

Выбор коммутационных аппаратов сведен в таблице 15.

Таблица 15 – Выбор коммутационных аппаратов

Параметры	ОРУ			ЗРУ	
	По расчету	По паспорту, ВРС-110/2500	По паспорту, РНДЗ-110/1000	По расчету	По паспорту, ВВ/TEL-10/1000 (630)
U _{ном} , кВ	110	110	110	10	10
I _{ном} , А	63,7	2500	1000	704,6 (216,7)	1000 (630)
I _{н.откл.} , кА	8,7	31,5	20	7,0	20
B _к , кА ² ·с	9,5	3600	1200	6,1	1200
i _{дин} , кА	15,0	40	40	11,8	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-10-20..300/5; 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: $i_{дин} = 74,5 \text{ кА} \geq i_{уд} = 11,8 \text{ кА}$.

По термической стойкости: $I_m^2 \cdot t_m = 2900 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \geq B_k = 6,14 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$.

– на ОРУ 110 кВ:

$$i_{дин} = 42 \text{ кА} \geq i_{уд} = 14,992 \text{ кА},$$

$$I_m^2 \cdot t_m = 3600 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \geq B_k = 9,45 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Условия выбора трансформаторов напряжения (ТН)» [13]:

$$U_{ном} \geq U_{уст},$$

$$S_{ном} \geq S_{2\Sigma}.$$

Принимаем ТН типа НАМИ-10-95.

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

$$S_{ном} = 200 \text{ ВА} \geq S_{2\Sigma} = 43 \text{ ВА}.$$

ТТ и ТН проходят проверку.

Выбор ячеек КРУ.

«Ячейки КРУ (комплектные распределительные устройства) – это современные электроустановки, предназначенные для приема, распределения и управления электрической энергией в сетях среднего и высокого напряжения. Они используются в различных отраслях промышленности, коммунальном хозяйстве и строительстве для обеспечения надежного и безопасного электроснабжения объектов» [20]. Ячейки могут быть адаптированы под различные условия эксплуатации и требования потребителей.

«Выбираются КРУ К-129, внешний вид – на рисунке 8.



Рисунок 8 – Ячейки КРУ

Ячейки КРУ состоят из нескольких основных компонентов:

- высоковольтные выключатели – устройства для оперативного отключения и включения электрических цепей;

- разъединители и заземлители – механизмы для безопасного отключения и заземления оборудования;
- измерительные трансформаторы – устройства для измерения напряжения и тока;
- системы управления и защиты – автоматические системы, которые контролируют работу установки и защищают оборудование от перегрузок и коротких замыканий» [20];
- корпус или шкаф – герметичная конструкция, обеспечивающая защиту оборудования от внешних воздействий и облегчающая монтаж и транспортировку.

Благодаря герметичному корпусу и современным системам защиты, КРУ минимизируют риски аварий и обеспечивают стабильную работу [15].

2.7 Выбор оборудования электрической сети механического цеха, заземление и молниезащита цеха

Для внутреннего электроснабжения цеха выбирается радиальная схема питания электроприемников от вводного распределительного пункта (РП), рисунок 9.

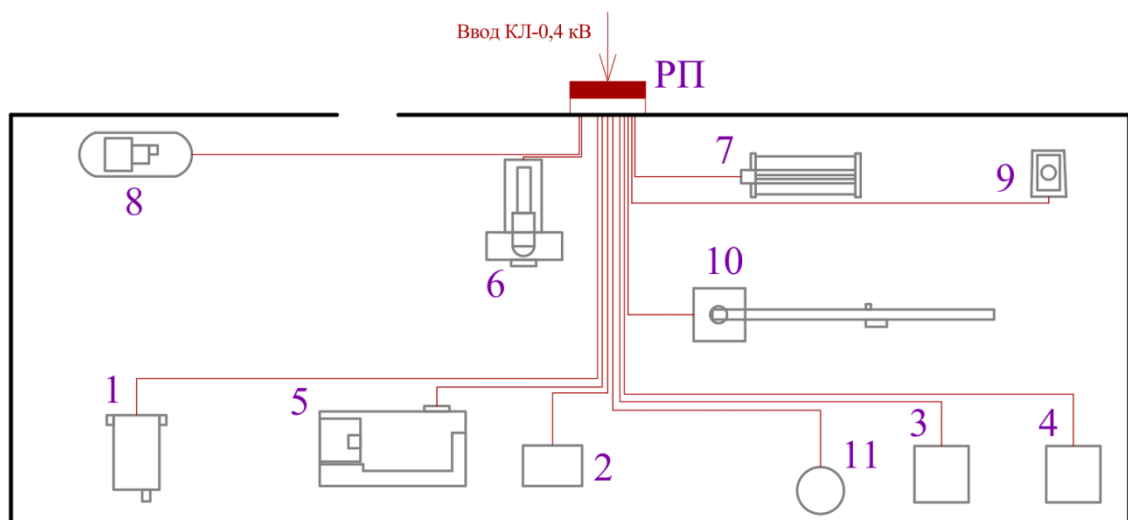


Рисунок 9 – План силовой сети механического цеха

«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 ВВГнг-LS, проложенными в защитных коробах в полу помещения» [16].

Расчет для КЛ до электроприемника №1.

«Наибольший ток линии:

$$I_p = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi}, \quad (44)$$

где P_n – номинальная активная нагрузка, кВА;

U_n – напряжение линии, кВ» [14].

$$I_p = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,5} = 30,3 \text{ А}$$

Выбирается кабель ВВГнг-LS - 5×4, $I_{\text{доп}} = 41 \text{ А}$ [18].

«При расчете потерь напряжения в сети до 1 кВ индуктивным сопротивлением проводов можно пренебречь ввиду его очень малого значения» [14]. По формуле (22):

$$\Delta U_n = \frac{\sqrt{3} \cdot 30,3 \cdot 21,9 \cdot 100}{0,38} (0,0046 \cdot 0,5 + 0 \cdot 0,841) = 0,66 \% < 5 \%$$

Выбор кабелей сведен в таблице 16.

Таблица 16 – Выбор кабелей силовой сети цеха

Участок	Ip,A	ВВГнг-LS, сечение	Idоп,A	ΔU,%
РП--ЭП1	30,3	5x4	41	0,66
РП--ЭП2	5,4	5x2,5	30	0,16
РП--ЭП3	15,2			0,90
РП--ЭП4				1,09
РП--ЭП5	9,0			0,29
РП--ЭП6	9,2			0,05
РП--ЭП7	10,0			0,11
РП--ЭП8	8,1			0,25
РП--ЭП9	31,1			5x4
РП--ЭП10	7,9	5x2,5	30	0,09
РП--ЭП11	5,5			0,22

«Все кабели подходят по условиям выбора (допустимому току и проверке потерь напряжения).

Выбор автоматических выключателей (АВ) проводится:

– по напряжению:

$$U_{ном} > U_c, \quad (45)$$

– по току теплового расцепителя (ТР):

$$I_{т.р.} > 1,1 \cdot I_p, \quad (46)$$

Для КЛ до электроприемника №1:

$$I_{т.р.} > 1,1 \cdot 30,3 = 33,34 \text{ A}$$

Устанавливается ВА-47-29 на номинальный ток 40 А» [14]. Выбор АВ на линиях до электроприемников сведен в таблице 17.

Таблица 17 – Выбор автоматических выключателей

№ ЭП	1,1·I _p , А	Авт. выкл.	I _{ном} , А
1	33,34	ВА-47-29	40
2	5,977		6
3	16,67		20
4			20
5	9,923		10
6	10,07		13
7	10,96		13
8	8,931		10
9	34,2		40
10	8,732		10
11	6,053		8

«Освещение рассчитывается методом коэффициента использования светового потока» [2]. Освещение выполняется светодиодными светильниками NT-PROM 100 Л.

«Число светильников:

$$N = \frac{E_H \cdot Z \cdot F \cdot K_3}{K_H \cdot \Phi}, \quad (47)$$

где E_H – норма освещенности, лк;

Z – коэффициент минимальной освещенности;

F – площадь участка, м²;

K_3 – коэффициент запаса;

K_H – коэффициент использования светового потока;

Φ – световой поток светильника, лм.

Индекс помещения:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)}, \quad (48)$$

где A, B, h – длина, ширина и высота помещения, м» [2].

$$i = \frac{27 \cdot 9,9}{8 \cdot (27 + 9,9)} = 0,91,$$

$$N = \frac{200 \cdot 1,1 \cdot 267,3 \cdot 1,2}{0,57 \cdot 16000} \approx 10 \text{ шт.}$$

«Аварийное освещение (АО) выбирается как не менее 5% от основного, требуемая мощность АО» [2]:

$$P_{ав} \geq 0,05 \cdot (100 \cdot 10) = 50 \text{ Вт}$$

Принимается 4 светильника Атлант, 15 Вт.

План осветительной сети цеха показан на рисунке 10.

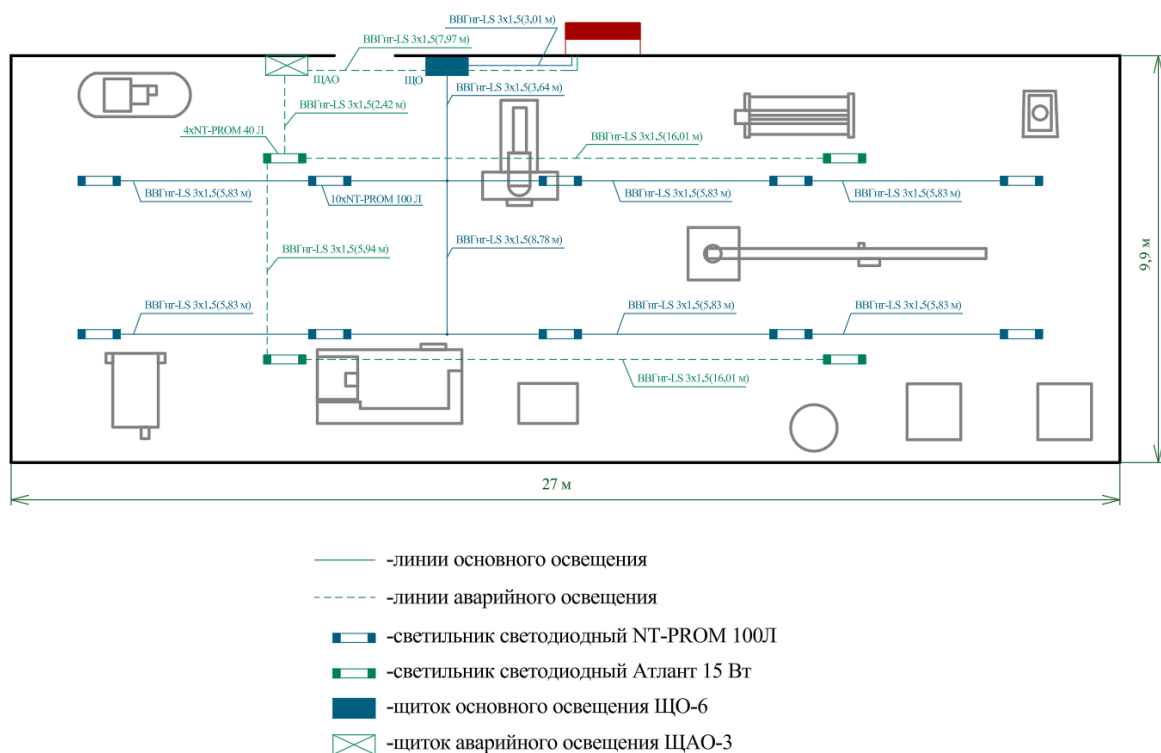


Рисунок 10 – План осветительной сети механического цеха

Заземляющее устройство и молниезащита обеспечат защиту персонала и надежную работу СЭС.

«Расчет заземляющего устройства (ЗУ).

Удельное сопротивление грунта для электродов:

$$\rho_p = \rho \cdot K_c, \quad (49)$$

где ρ – удельное сопротивление грунта, Ом · м;

K_c – коэффициент сезонности.

$$\rho_{pв} = 2000 \cdot 1,1 = 2200 \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

$$\rho_{pг} = 2000 \cdot 1,4 = 2800 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Для вертикальных электродов (ВЭ) используется угловая сталь 50х50 мм, для горизонтального электрода (ГЭ) используется полосовая сталь 50х5 мм.

Сопротивление растеканию одного ВЭ:

$$R_{овэ} = \frac{\rho_{pв}}{2 \cdot \pi \cdot l} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot l}{d} \right) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot t + l}{4 \cdot t - l} \right) \right], \quad (50)$$

где l – длина ВЭ, м;

d – приведенный диаметр ВЭ, м;

t – расстояние от поверхности до центра электрода, м.

$$d = 0,95 \cdot b, \quad (51)$$

где b – ширина уголка, мм [9].

$$d = 0,95 \cdot 0,05 = 0,0475 \text{ м},$$

$$t = 3 / 2 + 0,8 = 2,3 \text{ м},$$

$$R_{овэ} = \frac{2200}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot 3}{0,0475} \right) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot 2,3 + 3}{4 \cdot 2,3 - 3} \right) \right] = 60,898 \text{ Ом}.$$

«Расчетное число ВЭ:

$$n' = R_{063} / R_n, \quad (52)$$

где R_n – максимально допустимое сопротивление ЗУ, Ом.

$$n' = 60,898 / 4 = 15,2 \approx 16 \text{ шт}$$

Длина ГЭ:

$$l_z = 1,05 \cdot a \cdot n', \quad (53)$$

где a – расстояние между ВЭ, м.

$$a = l_{\text{пер}} / n', \quad (54)$$

где $l_{\text{пер}}$ – периметр здания, м» [9].

$$l_{\text{пер}} = 2 \cdot (27 + 9,9) = 36,9 \text{ м},$$

$$a = 36,9 / 16 = 2,31 \text{ м},$$

$$l_z = 1,05 \cdot 2,31 \cdot 16 = 38,81 \text{ м}.$$

«Сопротивление растеканию ГЭ:

$$R_{23} = \frac{\rho_{pz}}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left(\frac{l^2}{d \cdot t} \right), \quad (55)$$

где l – длина ГЭ, м;

d – расчетный диаметр ГЭ, м.

$$d = 0,5 \cdot b, \quad (56)$$

где b – ширина полосы, м.

$$d = 0,5 \cdot 0,05 = 0,025 \text{ м},$$

$$t = 0,05 / 2 + 0,8 = 0,825 \text{ м},$$

$$R_{\text{зз}} = \frac{2800}{2 \cdot 3,14 \cdot 38,81} \cdot \ln \left(\frac{38,81^2}{0,025 \cdot 0,825} \right) = 2,854 \text{ Ом}.$$

Сопротивление ЗУ:

$$R_{\text{зр}} = \frac{R_{\text{обз}} \cdot R_{\text{зз}}}{R_{\text{обз}} \cdot \eta_{\text{б}} \cdot n + R_{\text{зз}} \cdot \eta_{\text{з}}}, \quad (57)$$

где $\eta_{\text{б}}$ – коэффициент использования ВЭ;

$\eta_{\text{з}}$ – коэффициент использования ГЭ» [9].

$$R_{\text{зр}} = \frac{60,898 \cdot 2,854}{60,898 \cdot 0,51 \cdot 16 + 2,854 \cdot 0,3} = 3,808 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом}$$

В данном случае «молниезащита цеха реализуется с помощью молниеприемной сетки на крыше здания. Согласно требованиям ГОСТ Р 59789-2021 размер ячейки сетки принимается 5·5 метров, сетка выполняется стальным оцинкованным прутком диаметром 8 мм, уложенным на специальных пластиковых держателях, заполненных бетоном» [9].

Вывод. По результатам расчетов электрических нагрузок выбрано современное оборудование для системы электроснабжения. Предложено к установке электрооборудование отечественного производства от проверенных и надежных поставщиков. Проведена проверка ЭО по допустимым параметрам по местам установки в соответствии с рассчитанными режимами работы СЭС. Энергоэффективность СЭС будет обеспечиваться соответствующими предложенными техническими решениями, такими как применение энергосберегающих силовых трансформаторов, компенсация реактивной мощности, использование светодиодного освещения.

Заключение

Проведена разработка системы электроснабжения группы цехов завода производства силовых трансформаторов, почти все технологические операции по производству на предприятиях выполняются энергоемким промышленным электрооборудованием, таким образом, качественное и надежное электроснабжение критически важно для работы промышленных предприятий. Основную часть электрической нагрузки составляют различные металлообрабатывающие и прочие станки и технологические линии, сварочное оборудование различного типа, электрические печи, электроприводы, освещение зданий и территории. Всего на территории предприятия будет размещаться 17 производственных участков, в основном, это промышленные цеха, специализирующиеся на производстве и сборке элементов силовых трансформаторов. Производство осуществляется в специализированных цехах, которые группируются по отдельным этапам технологического процесса – изготовлению компонентов и элементов конструкции трансформаторов, сборочным операциям, комплектованию и настройке оборудования. Вместе со вспомогательными производственными участками, основные производственные цеха образуют цельное крупное предприятие – завод по производству силовых трансформаторов, который представляет собой огороженную железобетонным забором территорию, на которой расположены все производственные участки.

Производственные участки обеспечиваются электроэнергией через собственные трансформаторные подстанции напряжением 10/0,4 кВ, предназначенные для питания значительных нагрузок мощного электрического промышленного оборудования. Для питания высокомошных электродвигателей напряжением 10 кВ дымососов литейного цеха, около цеховой подстанции дополнительно монтируется отдельная распределительная установка высокого напряжения 10 кВ. Если общий уровень энергопотребления участка сравнительно невысокий, то он

подключается к ближайшей трансформаторной подстанции другого производственного объекта. Практически весь цикл производства организован с использованием энергозатратного промышленного электрооборудования, поэтому стабильная работа предприятия зависит от качественного и надежного снабжения электроэнергией. Основные потребители энергии включают разнообразный парк станков и технологических линий, сварочные аппараты различных типов, электрические печи, системы электропривода вентиляционных установок, водоснабжения, канализации, компрессорного оборудования, освещения помещений и территории завода.

Определены расчетные нагрузки производственных участков, рассчитаны рабочие и аварийные режимы электрической сети. Для электроснабжения цехов приняты к установке КТП с энергоэффективными силовыми трансформаторами марки ТМГ12, которые изготавливаются с применением высококачественной электротехнической стали и специальных покрытий для сердечников и обмоток, обеспечивается улучшенная геометрия сердечника и обмоток для минимизации потерь на вихревые токи и гистерезис. Данные трансформаторы имеют меньшие потери на вихревые токи и гистерезис, что позволяет экономить электроэнергию. Использование КТП позволяет снизить затраты на строительство и эксплуатацию цеховых подстанций. 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. Проведен выбор оборудования электрической сети механического цеха, рассмотрены заземление и молниезащита цеха.

В итоге предложена энергоэффективная, надежная и безопасная система электроснабжения, которая планируется к реализации.

Список используемой литературы

1. Анчарова Т. В. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений : учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2023. 415 с.
2. Ажикова А. К., Шабоянц Н. Г. Естественное и искусственное освещение : учебно-методическое пособие. Астрахань : АГМУ, 2023. 57 с.
3. Бирюлин В.И. Электроснабжение промышленных и гражданских объектов : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 204 с.
4. Голов Р. С. Управление энергосбережением на промышленном предприятии : монография. М. : Дашков и К, 2023. 458 с.
5. Иванов С.Н. Надежность электроснабжения : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 164 с.
6. Куксин А.В. Электроснабжение промышленных предприятий : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2021. 156 с.
7. Ополева Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов: Учебное пособие. М. : Форум, 2022. 416 с.
8. Петухов Р.А. Электроснабжение : учебное пособие. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2022. 328 с.
9. Полуянович Н.К. Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий. 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. Технология энергосбережения : учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. М. : ИНФРА-М, 2023. 336 с.
12. Сибикин Ю.Д. 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. Фризен В. Э. Расчет и выбор электрооборудования низковольтных распределительных сетей промышленных предприятий : учебное пособие. – 2-е изд., испр. Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2021. 194 с.
15. Хорольский В.Я. Эксплуатация систем электроснабжения : учебное пособие. М. : ИНФРА-М, 2021. 288 с.
16. Шеховцов В.П. Расчет и проектирование схем электроснабжения. Методическое пособие для курсового проектирования : учебное пособие. – 3-е изд., испр. М. : ИНФРА-М, 2023. 214 с.
17. Шеховцов В. П. Осветительные установки промышленных и гражданских объектов : учебное пособие. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2022. 158 с.
18. Шеховцов В.П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению : учебное пособие. – 3-е изд. М. : ИНФРА-М, 2023. 136 с.
19. Щербаков Е.Ф. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях : учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2023. 495 с.
20. Щербаков Е. Ф. Электрические аппараты : учебное пособие. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2022. 303 с.