

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 Проектирование системы электроснабжения металлообрабатывающего предприятия

Обучающийся

М.С. Моисеенко

(Инициалы Фамилия)


(личная подпись)

Руководитель

О.В. Федяй

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

Аннотация

Выпускная квалификационная работа (ВКР) включает в себя 54 страницы, 9 рисунков, 14 таблиц, 20 источников.

Объект исследования: металлообрабатывающее предприятие.

Предмет исследования: система электроснабжения предприятия.

Цель работы: проектирование надежной и безопасной в эксплуатации системы электроснабжения металлообрабатывающего предприятия.

Актуальность разработки: ввод в эксплуатацию планируемого к постройке металлообрабатывающего предприятия требует обязательного обеспечения качественного, безопасного и надежного электроснабжения производственных участков и промышленного оборудования. Грамотно спроектированная и правильно реализованная система электроснабжения предприятия обеспечит стабильность производственных процессов и высокое качество продукции. Предложенный проект системы электроснабжения будет использоваться для питания производственных участков и предприятия в целом.

Содержание ВКР включает в себя вопросы: характеристика предприятия, генеральный план предприятия, данные по производственным участкам и источнику питания; проектирование системы электроснабжения предприятия; расчет токов короткого замыкания; выбор оборудования электрической части электрооборудования главной понизительной подстанции; выбор терминалов релейной защиты; автоматизированная система технического учёта электрической энергии, реализация АСТУЭ; заземление подстанций.

Содержание

Введение.....	2
1 Исходные данные на проектирование	2
1.1 Характеристика предприятия	2
1.2 Генеральный план предприятия, данные по производственным участкам и источнику питания.....	3
2 Проектирование системы электроснабжения предприятия	6
2.1 Определение электрических нагрузок	6
2.2 Картограмма электрических нагрузок, выбор места расположения главной понизительной подстанции	10
2.3 Выбор силовых трансформаторов цеховых ТП 10/0,4 кВ	15
2.4 Компенсация реактивной мощности, выбор силовых трансформаторов главной понизительной подстанции	19
2.5 Выбор схемы внутреннего электроснабжения предприятия	24
2.6 Выбор кабелей распределительной сети и аппаратов защиты линий ...	26
2.7 Расчет токов короткого замыкания	29
2.8 Выбор оборудования электрической части главной понизительной подстанции.....	34
2.9 Автоматизированная система технического учёта электрической энергии, реализация АСТУЭ	41
2.10 Заземляющие устройства цеховых подстанций	41
2.11 Заземляющее устройство главной понизительной подстанции	45
Заключение	47
Список используемых источников	48

Введение

Электроснабжение металлообрабатывающих предприятий играет ключевую роль в обеспечении эффективной работы и повышении конкурентоспособности. Основными источниками выработки электроэнергии являются гидро- и тепловые электростанции. Энергия передаётся на центральные распределительные подстанции, откуда поступает на оборудование цеховых распредпунктов и затем к каждому потребителю. Основные элементы системы электроснабжения включают источники, электропередающие линии, пункты приёма энергии, распределительные сети и энергоприёмники (потребители). «Схемы сетей питания могут быть магистральными, радиальными или смешанными, в зависимости от потребностей потребителей. Для надёжного и безопасного функционирования систем электроснабжения предъявляются определённые требования» [13]. Подстанции должны быть надёжными, удобными и безопасными в эксплуатации, обеспечивать поставку энергии в требуемых количествах без перебоев.

Металлообработка является важной отраслью отечественной и общемировой промышленности. Металлические конструкции и изделия применяются повсеместно во всех сферах народного хозяйства и производственных отраслях, в различных типах и видах оборудования. По мере развития экономики страны, возрастает и потребность в расширении объемов производства металлических конструкций и изделий различных типов и назначения, для выпуска которых строятся и вводятся в эксплуатацию новые заводы и иные производственные объекты. Современная металлообработка является высокоавтоматизированной высокотехнологичной отраслью промышленности, требующей качественного и надёжного электроснабжения согласно требованиям актуальных нормативных и технических документов. При создании электроснабжения для металлообрабатывающих предприятий необходимо учитывать

специфику отрасли, включая потребности в трёхфазной подаче переменного тока и преобразовании постоянного тока для некоторых энергоприёмников. Таким образом, грамотное проектирование и монтаж систем электроснабжения позволяют обеспечить стабильное и эффективное функционирование металлообрабатывающих предприятий, что способствует повышению производительности и конкурентоспособности на рынке.

В данной работе выполняется проектирование системы электроснабжения (СЭС) металлообрабатывающего предприятия. Данный промышленный объект планируется к постройке в связи с расширением объемов выполняемых работ, а также растущим спросом рынка на продукцию в виде металлических конструкций и изделий различных типов и назначения. Ввод в эксплуатацию данного предприятия позволит обеспечить внутренние потребности рынка, а также увеличить прибыль государства путем продажи части продукции на отечественном и зарубежном рынках. Основной задачей при создании надёжной и безопасной системы электроснабжения является защита человека от поражения электрическим током. Для этого необходимо правильно подобрать кабели, рассчитать аппараты защиты и систему заземления. Важной задачей также является обеспечение бесперебойного функционирования всех электроприёмников, чтобы минимизировать вероятность простоя и порчи обрабатываемого материала.

Актуальность разработки: ввод в эксплуатацию планируемого к постройке металлообрабатывающего предприятия требует обязательного обеспечения качественного, безопасного и надежного электроснабжения производственных участков (ПУ) и промышленного оборудования. Грамотно спроектированная и правильно реализованная система электроснабжения предприятия обеспечит стабильность производственных процессов и высокое качество продукции. В целом, разработка СЭС актуальна, потому что ее грамотное проектирование влияет на расходы предприятия, бесперебойность работы оборудования и соблюдение требований безопасности. СЭС должна

соответствовать критериям сбалансированной нагрузки, безопасности, простоты схемы и возможности модернизации.

Объект исследования: металлообрабатывающее предприятие.

Предмет исследования: система электроснабжения предприятия.

Цель работы: проектирование надежной и безопасной в эксплуатации системы электроснабжения металлообрабатывающего предприятия.

Задачи работы:

- провести расчет электрических нагрузок;
- выбрать место расположения главной понизительной подстанции (ГПП);
- выбрать энергоэффективные силовые трансформаторы цеховых подстанций;
- рассчитать компенсацию реактивной мощности (КРМ), выбрать силовые трансформаторы ГПП;
- рассчитать схему внутреннего электроснабжения, выбрать кабели и аппараты защиты линий распределительной сети;
- рассчитать токи короткого замыкания (КЗ);
- выбрать основное оборудование электрической части ГПП;
- выбрать оборудование микропроцессорной релейной защиты и автоматики (РЗА);
- рассмотреть реализацию автоматизированной системы технического учета электроэнергии (АСТУЭ);
- рассчитать заземляющие устройства подстанций, повести их проверку по эквивалентным сопротивлениям.

При проектировании СЭС необходимо учитывать актуальные требования по ее эксплуатационной безопасности, обеспечению требуемой надежности электроснабжения потребителей, а также условий обеспечения энергосбережения.

1 Исходные данные на проектирование

1.1 Характеристика предприятия

Металлообрабатывающее предприятие будет являться важным звеном в промышленном секторе экономики. Оно будет заниматься обработкой металла, создавая различные металлические изделия и детали. Такие предприятия играют ключевую роль в росте производительности труда во всех отраслях промышленности. металлообрабатывающие предприятия могут быть частью различных отраслей хозяйства, таких как лесная и деревообрабатывающая промышленность, медицинская промышленность и машиностроение. Они используют современные технологии и оборудование, включая специализированные станки с программным управлением, для выполнения различных работ по обработке металла. История металлообработки уходит корнями в древние времена, когда основными инструментами были кузнецы. Сегодня ручная металлообработка практически не используется, её заменили многофункциональные станки с программным управлением. Таким образом, рассматриваемое металлообрабатывающее предприятие будет являться неотъемлемой частью современной экономики страны, обеспечивая потребности различных отраслей промышленности в металлических изделиях и деталях. Металлоконструкции будут использоваться для собственных потребностей государства при проведении различных выполняемых работ и для реализации различных проектов. Для минимизации уровня брака и обеспечения высокого качества продукции требуется разработать качественное электроснабжение предприятия, которое обеспечит надежную и стабильную работу станков, технологических линий и остального промышленного оборудования.

1.2 Генеральный план предприятия, данные по производственным участкам и источнику питания

Генплан предприятия показан на рисунке 1.

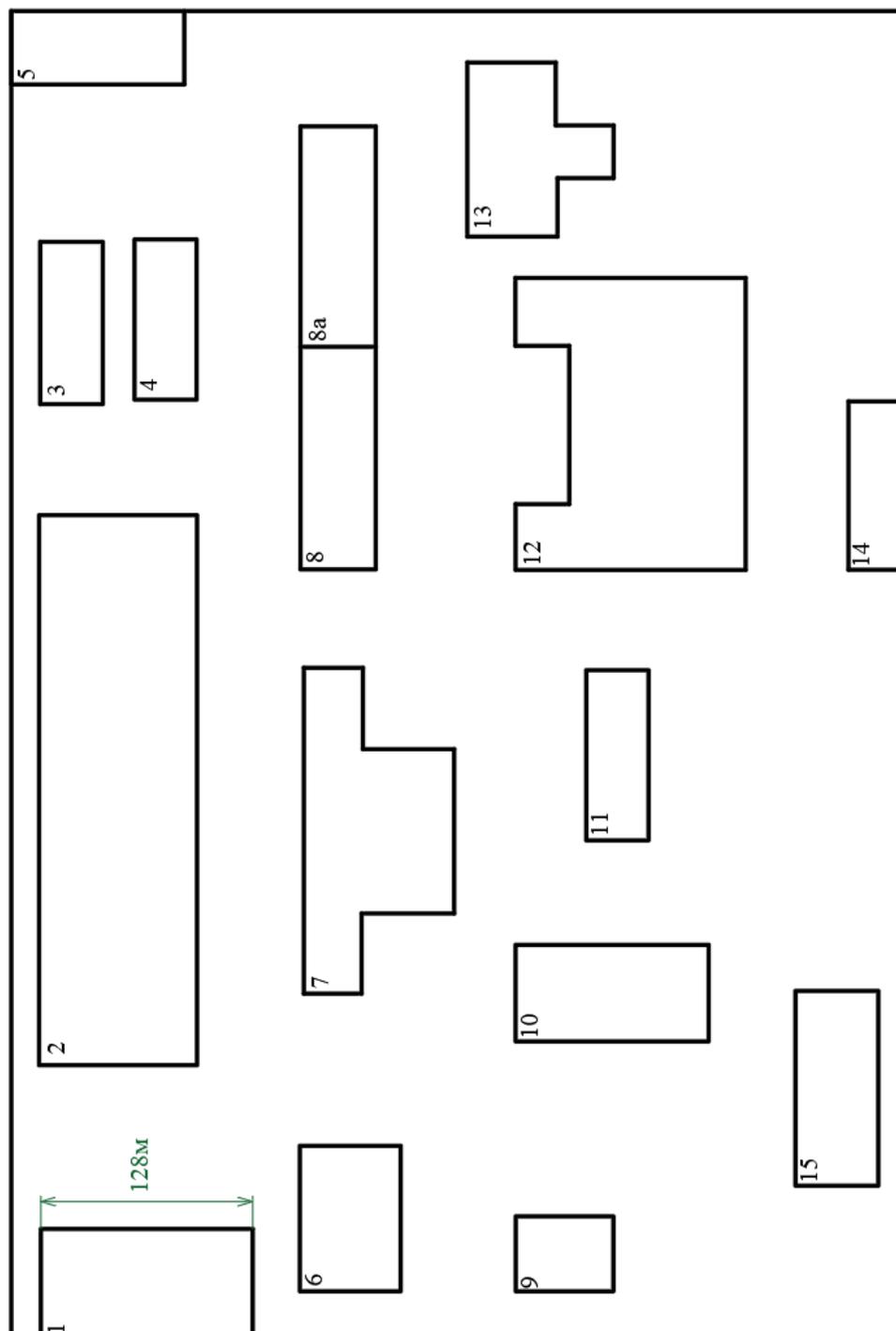


Рисунок 1 – Генплан предприятия

Производственные участки (ПУ) и их параметры по электропотреблению приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Производственные участки

Номер на генплане	Цеха	$\Sigma P_{\text{ном}}$, кВт	cosφ	Kс
1	АБК	430	0,8	0,35
2	Цех металлоизделий №1	4100	0,8	0,35
3	Кузнечный цех	980	0,8	0,35
4	Склад	35	0,7	0,2
5	Сборочный цех	270	0,6	0,7
6	Компрессорная: а) 0,38 кВ	250	0,8	0,65
6	б) синхр. двиг. 10 кВ	2000	0,8	0,65
7	Склад	25	0,8	0,2
8	Ремонтно-механический цех	492	0,8	0,45
8а	Кузнечно-прессовый цех	1100	0,8	0,55
9	Котельная	600	0,8	0,65
10	Цех металлических деталей	320	0,6	0,8
11	Цех металлоизделий №2	480	0,7	0,4
12	Литейный цех: а) 0,38 кВ	3900	0,8	0,6
12	б) синхр. двиг. 10 кВ	1600	0,8	0,6
13	Цех металлоизделий №3	1900	0,8	0,3
14	Насосная	135	0,8	0,75
15	Цех металлоизделий №4	970	0,8	0,4

Источник питания ГПП предприятия – шины 110 кВ подстанции (ПС) энергосистемы, питание ГПП будет выполнено воздушной линией (ВЛ) с проводами АС-70/11, длина трассы ВЛ составит 13 км. Категории надёжности электроснабжения участков приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Требования к надёжности электроснабжения участков

Участки	Категория
АБК	3
Цех металлоизделий №1	2
Кузнечный цех	2
Склад	3
Сборочный цех	2
Компрессорная	2
Склад	3
Ремонтно-механический цех	2
Кузнечно-прессовый цех	2
Котельная	1
Цех металлических деталей	2
Цех металлоизделий №2	2
Литейный цех	1
Цех металлоизделий №3	2
Насосная	1
Цех металлоизделий №4	2

Вывод по разделу. Рассмотрены общая характеристика предприятия и его основной вид деятельности. Новый промышленный объект, предприятие по производству металлических конструкций и изделий различных типов и назначения, планируется к постройке, для него требуется разработать качественную и надежную систему электроснабжения. Согласно проектной документации, составлен генеральный план предприятия, составлен перечень производственных участков и систематизированы данные по их электропотреблению. Приведены данные по источнику питания главной понизительной подстанции предприятия. Систематизированы необходимые данные для проектирования системы электроснабжения предприятия.

2 Проектирование системы электроснабжения предприятия

2.1 Определение электрических нагрузок

Определение электрических нагрузок предприятия является важным этапом проектирования электрической сети. Оно позволяет выбрать оптимальное оборудование, обеспечить надёжное и эффективное электроснабжение потребителей. Электрические нагрузки делятся на активные и реактивные. Активная нагрузка – это мощность, которая преобразуется в другие виды энергии, например, в тепловую или световую. Реактивная нагрузка – это мощность, которая не используется для выполнения полезной работы, а только для создания электромагнитных полей. «Для определения электрических нагрузок используются различные методы, такие как метод коэффициента спроса нагрузок (для крупных промышленных предприятий), метод упорядоченных диаграмм и метод статистических испытаний. Точное определение электрических нагрузок позволяет избежать ошибок при выборе оборудования и обеспечивает надёжное и эффективное электроснабжение предприятия.

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

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

где K_c – коэффициент спроса нагрузки;

$P_{ном}$ – номинальная нагрузка, кВт» [11].

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

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

Пример расчета, участок №1, по (1-3):

$$P_c = 0,35 \cdot 430 = 150,5 \text{ кВт},$$

$$Q_c = 150,5 \cdot 0,75 = 112,88 \text{ квар},$$

$$S_c = \sqrt{150,5^2 + 112,88^2} = 188,13 \text{ кВА}.$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Нагрузки предприятия

Цеха	Номер на генплане	$\Sigma P_{ном}$, кВт	tgφ	Kc	Среднесменные нагрузки		
					Pc, кВт	Qc, квар	Sc, кВА
АБК	1	430	0,75	0,35	150,50	112,88	188,13
Цех металлоизделий №1	2	4100	0,75	0,35	1435,00	1076,25	1793,75
Кузнечный цех	3	980	0,75	0,35	343,00	257,25	428,75
Склад	4	35	1,02	0,2	7,00	7,14	10,00
Сборочный цех	5	270	1,33	0,7	189,00	252,00	315,00
Компрессорная: а) 0,38 кВ	6	250	0,75	0,65	162,50	121,88	203,13
б) синхр. двиг. 10 кВ	6	2000	0,75	0,65	1300,00	0,00	1300,00
Склад	7	25	0,75	0,2	5,00	3,75	6,25
Ремонтно-механический цех	8	492	0,75	0,45	221,40	166,05	276,75
Кузнечно-прессовый цех	8а	1100	0,75	0,55	605,00	453,75	756,25
Котельная	9	600	0,75	0,65	390,00	292,50	487,50
Цех металлических деталей	10	320	1,33	0,8	256,00	341,33	426,67
Цех металлоизделий №2	11	480	1,02	0,4	192,00	195,88	274,29
Литейный цех: а) 0,38 кВ	12	3900	0,75	0,6	2340,00	1755,00	2925,00
б) синхр. двиг. 10 кВ	12	1600	0,75	0,6	960,00	0,00	960,00
Цех металлоизделий №3	13	1900	0,75	0,3	570,00	427,50	712,50
Насосная	14	135	0,75	0,75	101,25	75,94	126,56
Цех металлоизделий №4	15	970	0,75	0,4	388,00	291,00	485,00
Всего	-	-	-	-	9615,65	5830,09	11245,03

«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» [18].

Освещение предприятий светодиодными светильниками – это современный и эффективный способ улучшить качество освещения на производстве. Светодиоды имеют ряд преимуществ перед традиционными источниками света, такими как лампы накаливания и люминесцентные лампы. Они потребляют меньше энергии, служат дольше и обеспечивают более равномерное освещение. Светодиодные светильники также обладают высокой степенью защиты от пыли, влаги и механических воздействий, что делает их идеальным выбором для использования на промышленных предприятиях. Кроме того, светодиоды не содержат вредных веществ, что обеспечивает экологическую безопасность. «Применение светодиодных светильников позволяет снизить затраты на электроэнергию, обслуживание системы освещения и повысить производительность труда. Это достигается благодаря низкому энергопотреблению, надёжности и долговечности светильников, а также улучшению условий труда персонала. Таким образом, освещение предприятий светодиодными светильниками является перспективным направлением развития систем освещения» [18]. Оно

позволяет повысить эффективность производства, улучшить условия труда и снизить негативное воздействие на окружающую среду.

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

$$P_{po} = 4,4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 \cdot 3332,1 = 11,73 \text{ кВт},$$

$$Q_{po} = 11,73 \cdot 0,329 = 3,86 \text{ квар.}$$

С освещением, итого нагрузки ПУ №1:

$$P_p' = 150,5 + 11,73 = 162,23 \text{ кВт},$$

$$Q_p' = 112,88 + 3,86 = 116,73 \text{ квар},$$

$$S_p' = \sqrt{162,23^2 + 116,73^2} = 199,86 \text{ кВА.}$$

Расчетные нагрузки предприятия сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Расчетные нагрузки предприятия

Участки	Рр', кВт	Qp', квар	Sp', кВА
АБК	162,23	116,73	199,86
Цех металлоизделий №1	1482,10	1091,75	1840,80
Кузнечный цех	347,61	258,77	433,36
Склад	8,89	7,76	11,80
Сборочный цех	196,69	254,53	321,67
Компрессорная: а) 0,38 кВ	169,83	124,29	210,45
б) синхр. двиг. 10 кВ	1300,00	0,00	1300,00
Склад	16,50	7,53	18,14
Ремонтно-механический цех	230,71	169,11	286,05
Кузнечно-прессовый цех	615,40	457,17	766,63

Продолжение таблицы 4

Участки	P_p' , кВт	Q_p' , квар	S_p' , кВА
Котельная	393,75	293,73	491,24
Цех металлических деталей	269,92	345,91	438,77
Цех металлоизделий №2	197,16	197,58	279,12
Литейный цех: а) 0,38 кВ	2373,69	1766,09	2958,63
б) синхр. двиг. 10 кВ	960,00	0,00	960,00
Цех металлоизделий №3	577,74	430,05	720,22
Насосная	107,44	77,97	132,75
Цех металлоизделий №4	396,00	293,63	492,98
Σ по цехам	9805,65	5997,29	11494,27
Территория	58,27	19,17	61,35
Всего	9863,93	6016,47	11554,00

Далее определяется оптимальное местоположение ГПП.

2.2 Картограмма электрических нагрузок, выбор места расположения главной понизительной подстанции

«Картограмма электрических нагрузок – это графическое изображение распределения нагрузок на территории промышленного предприятия, представленное в виде окружностей, площади которых соответствуют расчётным нагрузкам цехов» [11]. В идеале, главная понизительная подстанция (ГПП) должна располагаться как можно ближе к центру нагрузок, чтобы обеспечить оптимальное потребление электрической энергии и минимизировать протяжённость распределительных сетей.

Картограмма нагрузок позволяет проектировщику наглядно представить распределение нагрузок на территории промышленного предприятия и выбрать оптимальное место для расположения ГПП.

«Радиус окружностей нагрузок:

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

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.

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» [2].

Расчет координат ЦЭН приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Расчет координат ЦЭН

Цеха	X_i , м	Y_i , м	S_p , кВА	$S_p \cdot X_i$, кВА	$S_p \cdot Y_i$, кВА
АБК	19,61	286,76	199,86	3919,3	57312,6
Цех металлоизделий №1	220,6	299,02	1840,80	406080,0	550435,3
Кузнечный цех	411,8	318,63	433,36	178455,7	138080,0
Склад	411,8	279,41	11,80	4858,6	3296,6
Сборочный цех	522,1	306,37	321,67	167944,9	98550,6
Компрессорная: а) 0,38 кВ	44,12	208,33	210,45	9285,0	43842,9
б) синхр. двиг. 10 кВ	44,12	208,33	1300,00	57356,0	270829,0
Склад	201	198,53	18,14	3646,4	3601,6
Ремонтно-механический цех	357,8	213,24	286,05	102348,2	60997,0
Кузнечно-прессовый цех	446,1	213,24	766,63	341994,3	163476,5
Котельная	31,86	127,45	491,24	15650,8	62608,2
Цех металлических деталей	139,7	110,29	438,77	61295,6	48391,5
Цех металлоизделий №2	237,7	110,29	279,12	66346,5	30784,0
Литейный цех: а) 0,38 кВ	372,5	105,39	2958,63	1102088,7	311809,7
б) синхр. двиг. 10 кВ	372,5	105,39	960,00	357600,0	101174,4
Цех металлоизделий №3	485,3	137,25	720,22	349523,0	98850,3
Насосная	345,6	9,80	132,75	45878,8	1301,5
Цех металлоизделий №4	102,9	24,51	492,98	50728,1	12083,1
Всего			11554,0	3325000,0	2057424,7
Координаты ЦЭН	X, м	Y, м	-	-	-
	287,8	148,1	-	-	-

Например, для ПУ №1, по (6,7):

$$R = \sqrt{\frac{199,86}{0,5 \cdot 3,14}} = 11,28 \text{ м,}$$

$$\alpha = 360 \cdot 15,64 / 199,86 = 28,2^\circ.$$

Расчеты сведены в таблицу 6.

Таблица 6 – Расчет картограммы нагрузок

Цеха	R, м	α	S _{ос} , кВА
АБК	11,28	28,2	15,64
Цех металлоизделий №1	34,24	12,3	62,80
Кузнечный цех	16,61	5,1	6,15
Склад	2,74	76,7	2,51
Сборочный цех	14,31	11,5	10,25
Компрессорная: а) 0,38 кВ	11,58	16,7	9,77
б) синхр. двиг. 10 кВ	28,78	0,0	0,00
Склад	3,40	304,4	15,34
Ремонтно-механический цех	13,50	15,6	12,41
Кузнечно-прессовый цех	22,10	6,5	13,87
Котельная	17,69	3,7	4,99
Цех металлических деталей	16,72	15,2	18,57
Цех металлоизделий №2	13,33	8,9	6,88
Литейный цех: а) 0,38 кВ	43,41	5,5	44,92
б) синхр. двиг. 10 кВ	24,73	0,0	0,00
Цех металлоизделий №3	21,42	5,2	10,31
Насосная	9,20	22,4	8,25
Цех металлоизделий №4	17,72	7,8	10,66

Картограмма нагрузок приведена на рисунке 2.

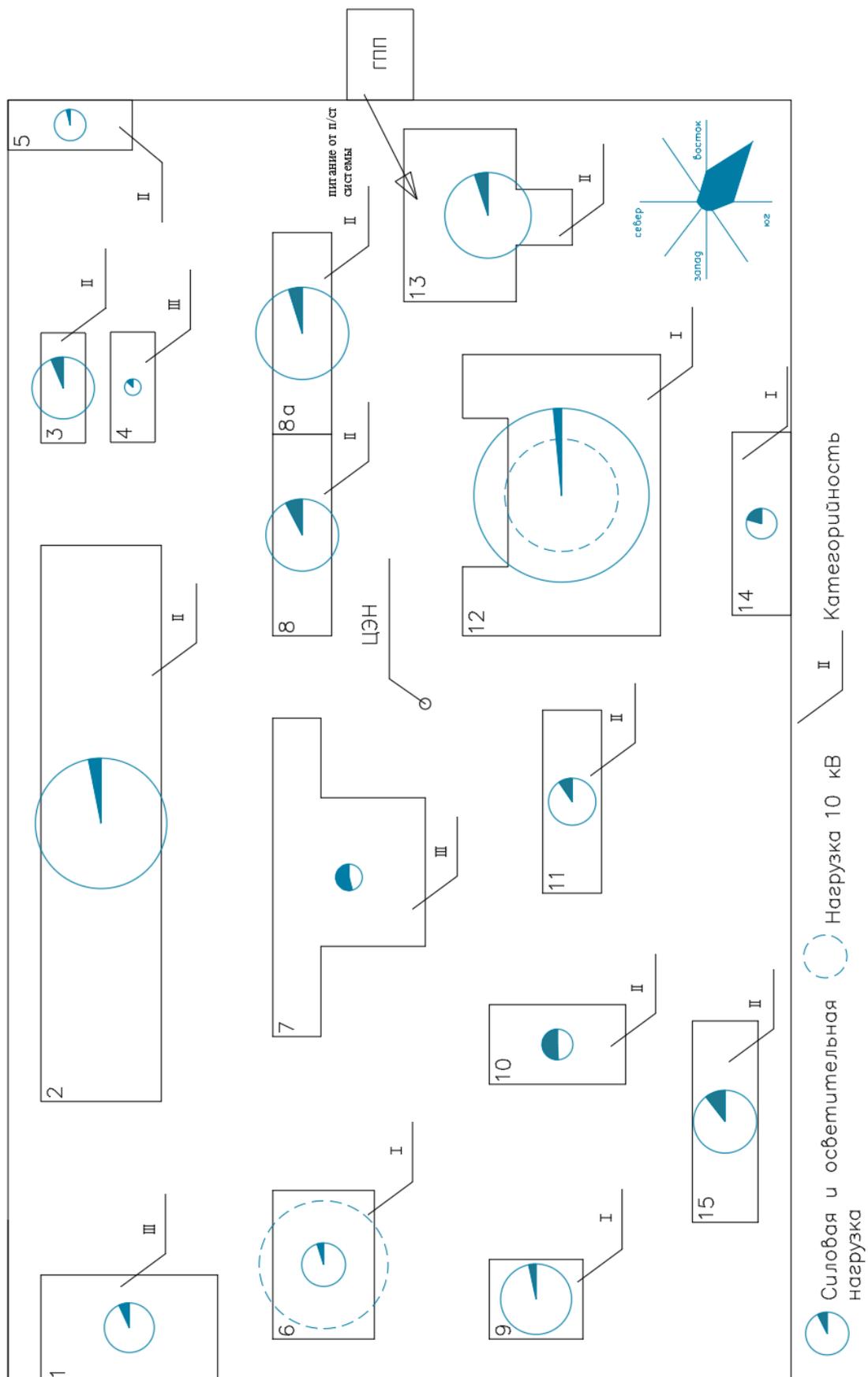


Рисунок 2 – Картограмма нагрузок

Главная понизительная подстанция будет установлена за территорией, с учетом розы ветров и направления подхода питающей линии 110 кВ.

2.3 Выбор силовых трансформаторов цеховых ТП 10/0,4 кВ

Силовые трансформаторы играют важную роль в системах электроснабжения промышленных предприятий. Они используются в главных понизительных и цеховых подстанциях для преобразования и распределения электроэнергии. Выбор трансформаторов зависит от различных факторов, таких как категория надёжности электроснабжения потребителей, компенсация реактивных нагрузок, перегрузочная способность и шаг стандартных мощностей. Выбор силовых трансформаторов для цеховых подстанций – важный аспект электроснабжения и построения рациональных сетей. Он зависит от требований надёжности, режима работы приёмников и перспективного развития предприятия [3]. При выборе количества трансформаторов учитывают перспективное развитие предприятия и возможность увеличения мощности оборудования. В целом, выбор силовых трансформаторов для цеховых подстанций зависит от конкретных условий и требований предприятия, но в основе лежит обеспечение надёжного и бесперебойного электроснабжения потребителей [14]. «Нагрузки производственных участков группируются по ТП 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 надёжности 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 (PM):

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

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

P_p – активная нагрузка, кВт.

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

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

где Q_p – реактивная нагрузка, квар.

При отрицательном значении $Q_{0,4}$, либо менее 50 квар, компенсация не требуется. В случае выбора установок КРМ, рассчитывается остаточное значение PM» [19]:

$$Q_{HH} = Q_p - Q_{БК} \quad (12)$$

Для ТП-2 (зона охвата нагрузок – цех №2), по (9):

$$S_o = \frac{1840,8}{0,7 \cdot 2} = 1315 \text{ кВА}$$

Устанавливается два энергоэффективных трансформатора ТМГ12-1600/10. Энергоэффективные силовые трансформаторы – это современное оборудование, которое помогает снижать потери электроэнергии и повышать качество электроснабжения. Они используются в различных отраслях промышленности и коммунального хозяйства. Серия ТМГ12 разработана с учётом рекомендаций Европейского комитета по электротехнике (CENELEC). Эти трансформаторы имеют низкий уровень потерь холостого хода и короткого замыкания, что позволяет им экономить электроэнергию ещё больше. Использование энергоэффективных трансформаторов помогает предприятиям снижать свои финансовые потери, связанные с потерями в распределительных сетях, и улучшать имидж, обеспечивая энергосбережение и охрану окружающей среды [4], [5].

Выбор трансформаторов цеховых ТП сведен в таблицу 7.

Таблица 7 – Выбор трансформаторов ТП

Подстанции	Зона охвата, № цехов	So, кВА	St, кВА (ТМГ12)
ТП-2	2	1315	1600
ТП-3	3,4	318	400
ТП-8	8	204	250
ТП-8а	8а	548	630
ТП-9	9	351	400
ТП-12	12	2113	2500
ТП-13	13	514	630
ТП-15	15	352	400
ТП-6	6,1, осв. терр.	335	400
ТП-14	14	95	100
ТП-5	5	230	250
ТП-10	10,7	325	400
ТП-11	11	199	250

Расчет КРМ на ТП-1, по (10,11):

$$Q_1 = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 1600)^2 - 1482,1^2} = 1680 \text{ квар},$$

$$Q_{0,4} = 1091,75 - 1680 = -588 \text{ квар}.$$

«КРМ не требуется. Коэффициент загрузки трансформатора в послеаварийном режиме:

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

$$K_n = \frac{1840,8}{1600} = 1,15 \leq 1,4.$$

Расчет КРМ на ТП и проверка трансформаторов по перегрузке приведены в таблице 8» [9].

Таблица 8 – Расчет КРМ на ТП и проверка трансформаторов по перегрузке

Подстанции	Q _{0,4} , квар	K _п
ТП-2	-588	1,15
ТП-3	-165	1,11
ТП-8	-94	1,14
ТП-8а	-175	1,22
ТП-9	-104	1,23
ТП-12	-806	1,18
ТП-13	-236	1,14
ТП-15	-102	1,23
ТП-6	-141	1,17
ТП-14	-12	1,33
ТП-5	-35	1,29
ТП-10	-128	1,14
ТП-11	-92	1,12

ТП выбираются комплектные 2КТПН-10/0,4. КТПН применяются в различных отраслях, включая промышленность, медицину, образование, агропромышленный комплекс и жилищно-коммунальное хозяйство. По способу монтажа они делятся на внутренние и наружные. Внутренние подстанции размещаются в цехах или специальных помещениях, а наружные выполнены в виде модульных зданий с металлическими шкафами, установленными на ленточном фундаменте или сваях. Основные элементы КТП включают устройства высшего напряжения (УВН), силовые трансформаторы, соединения силовых трансформаторов с УВН и распределительные устройства низшего напряжения (РУНН). В подстанциях наружной установки с воздушным вводом предусмотрены устройства для внешнего подключения. При выборе КТП учитываются пожелания заказчика и особенности эксплуатации подключаемого объекта. Преимущества КТП заключаются в их компактности, удобстве монтажа и обслуживания, а также высокой степени защиты от перегрузок и короткого замыкания. Они обеспечивают стабильное и надёжное электроснабжение различных объектов промышленности и гражданского сектора [15].

2.4 Компенсация реактивной мощности, выбор силовых трансформаторов главной понизительной подстанции

Компенсация реактивной мощности – это процесс воздействия на баланс реактивной мощности в электрической сети с целью регулирования напряжения. Этот процесс особенно важен для крупных промышленных предприятий, где основными приёмниками электрической энергии являются асинхронные двигатели [4]. В данном случае 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, %» [19].

Для ТП-1, по (14,15):

$$\Delta P_m = \frac{16}{2} \cdot \frac{1482,1^2 + 1091,75^2}{1600^2} + 2 \cdot 1,7 = 13,99 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_m = \frac{6}{2 \cdot 100} \cdot \frac{1482,1^2 + 1091,75^2}{1600^2} + \frac{2 \cdot 0,5}{100} \cdot 1600 = 79,54 \text{ квар}.$$

Нагрузка ТП с учетом потерь рассчитана в таблице 9.

Таблица 9 – Нагрузка ТП с учетом потерь

Подстанции	ΔP , кВт	ΔQ , квар	$P_p + \Delta P$, кВт	$Q_p + \Delta Q$, квар
ТП-2	13,99	79,54	1496,09	1171,28
ТП-3	4,11	17,54	360,61	284,07
ТП-8	2,98	11,86	233,68	180,98
ТП-8а	6,60	34,47	622,00	491,65
ТП-9	4,73	19,97	398,47	313,71

Продолжение таблицы 9

Подстанции	ΔP , кВт	ΔQ , квар	$P_p + \Delta P$, кВт	$Q_p + \Delta Q$, квар
ТП-12	20,36	121,29	2394,05	1887,37
ТП-13	6,01	31,46	583,75	461,51
ТП-15	4,75	20,07	400,75	313,70
ТП-6	4,42	18,78	394,75	278,97
ТП-14	1,96	6,77	109,40	84,74
ТП-5	3,54	13,81	200,23	268,34
ТП-10	4,24	18,04	290,66	371,49
ТП-11	2,88	11,51	200,03	209,09
РУ-1	-	-	1300,00	0,00
РУ-2	-	-	960,00	0,00
Всего	80,56	405,12	9944,48	6421,59

«Итоговая реактивная нагрузка ГПП:

$$Q_{10} = \sum Q_{HH} + \sum \Delta Q_m, \quad (16)$$

где $\sum Q_{HH}$ – реактивная нагрузка, квар;

$\sum \Delta Q_m$ – потери РМ в трансформаторах, квар.

Итоговая активная нагрузка ГПП:

$$P_{сумм} = \sum P_p + \sum \Delta P_m, \quad (17)$$

где $\sum P_p$ – активная нагрузка ТП, кВт;

$\sum \Delta P_m$ – потери активной мощности в трансформаторах, кВт» [14].

$$Q_{10} = 6016,47 + 405,12 = 6421,59 \text{ квар,}$$

$$P_{сумм} = 9863,93 + 80,56 = 9944,48 \text{ кВт.}$$

«Требуемая для компенсации на каждой шине 10 кВ РМ:

$$Q_{\text{кв}} / 2 = \frac{Q_{10} + \Delta Q_m - Q_{\text{сист}} - Q_c}{2}, \quad (18)$$

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

ΔQ_m – предварительные потери РМ в трансформаторах ГПП, квар.

$$Q_{\text{сист}} = \alpha \cdot \sum P_p \quad (19)$$

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

$$Q_c = \frac{\alpha_m \cdot P_n \cdot \text{tg}\varphi_n}{\eta_n}, \quad (20)$$

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.» [11].

$$\Delta Q_m = \frac{10,5}{2 \cdot 100} \cdot \frac{9944,48^2 + 6421,59^2}{10000^2} + \frac{2 \cdot 0,7}{100} \cdot 10000 = 1401,25 \text{ квар},$$

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

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

$$Q_{\text{кв}} / 2 = \frac{6421,59 + 1401,25 - 0,33 \cdot 9863,93 - 1162,11 - 1452,63}{2} = 977 \text{ квар}.$$

Устанавливается две конденсаторные батареи УККРМ-10,5-1000 по 1000 квар и трансформаторы ТДН-10000/110, внешний вид приведен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Трансформатор ТДН-10000/110

Нагрузки после КРМ:

$$Q_{pk} = 6421,59 - 2 \cdot 1000 = 4421,59 \text{ квар,}$$

$$P_{pk} = P_{сумм} = 9944,48 \text{ кВт.}$$

«Полная нагрузка ГПП:

$$S_p = \sqrt{(k_{pма} \cdot P_{pk})^2 + (k_{pмп} \cdot Q_{pk})^2}, \quad (21)$$

где $k_{pма}$ и $k_{pмп}$ – коэффициенты разновременности нагрузок» [19].

$$S_p = \sqrt{(0,9 \cdot 9944,48)^2 + (0,9 \cdot 4421,59)^2} = 9794,85 \text{ кВА}$$

Послеаварийная перегрузка, по (13):

$$K_n = \frac{9794,85}{10000} = 0,979 < 1,4$$

Потери мощности в трансформаторах, по (14,15):

$$\Delta P_m = \frac{60}{2} \cdot \frac{8950,04^2 + 3979,43^2}{10000^2} + 2 \cdot 14 = 86,45 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_m = \frac{10,5}{2 \cdot 100} \cdot \frac{8950,04^2 + 3979,43^2}{10000^2} + \frac{2 \cdot 0,7}{100} \cdot 10000 = 1162,87 \text{ квар}.$$

Итого нагрузка ГПП по ВН:

$$S_p = \sqrt{(8950,04 + 86,45)^2 + (3979,43 + 1162,87)^2} = 10397,18 \text{ кВА}$$

Далее выбирается схема внутривозовского электроснабжения.

2.5 Выбор схемы внутреннего электроснабжения предприятия

Выбор схемы внутреннего электроснабжения предприятия является важным этапом организации электроснабжения на объекте. Этот процесс включает определение типа схемы, установку вводного распределительного устройства, монтаж проводки, стояковых и групповых щитов, организацию электропитания и подключение конечных устройств. «Основными способами увеличения надёжности и экономичности схемы электроснабжения являются сокращение количества ступеней трансформации, отсутствие резервных линий и трансформаторов, секционирование шин и организация параллельной работы трансформаторов и линий при ударных нагрузках.

Распространёнными схемами внутреннего электроснабжения являются радиальные и магистральные схемы. Радиальные схемы делятся на одноступенчатые и двухступенчатые и используются при размещении

потребителей в разных направлениях относительно источника питания» [13].
 Магистральные схемы применяются в случаях сосредоточенной нагрузки или расположения узлов в одном направлении относительно подстанции. При выборе схемы внутреннего электроснабжения необходимо учитывать расположение потребителей и источников питания, требуемую надёжность, величины мощностей и напряжений, а также экономические показатели. «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 АВШв. Кабели прокладываются в траншеях под землей» [15].

План кабельных трасс показан на рисунке 4.

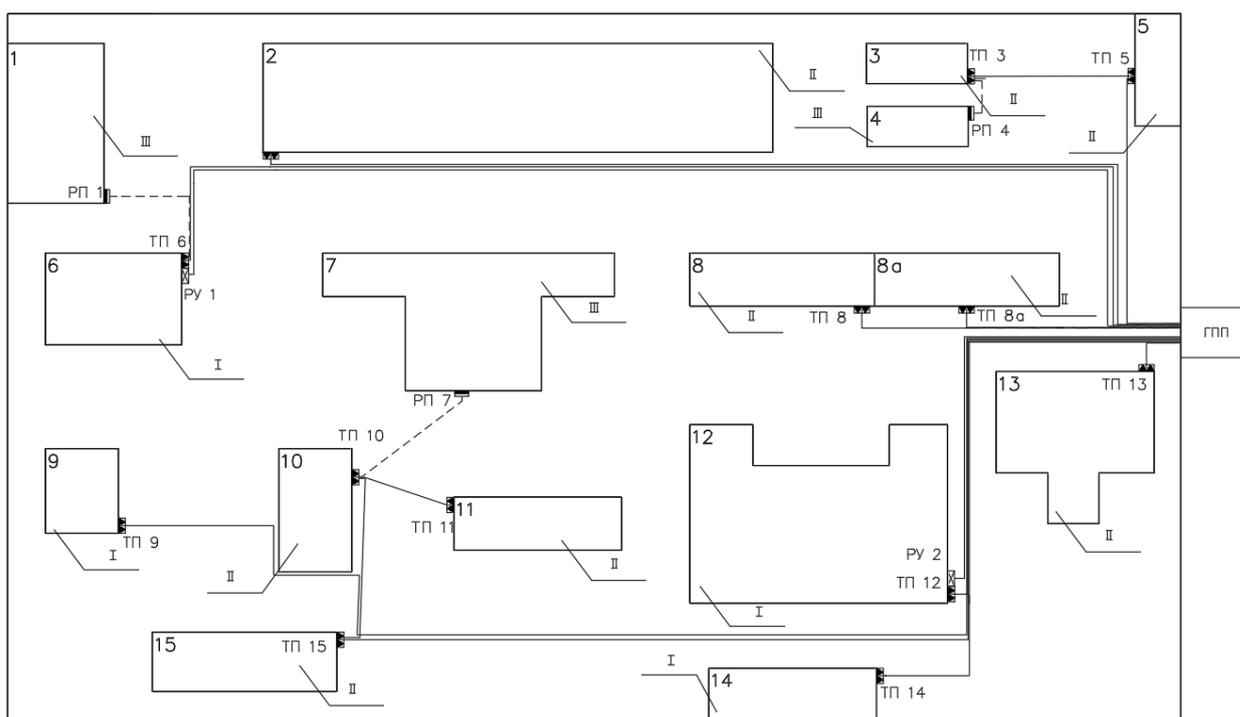


Рисунок 4 – План кабельных трасс

Необходимо также выбрать кабели и аппараты защиты линий.

2.6 Выбор кабелей распределительной сети и аппаратов защиты линий

Выбор кабелей и аппаратов защиты линий – важный этап проектирования и монтажа электрической системы. При выборе кабелей следует учитывать способ прокладки, условия эксплуатации, нагрузку и технические характеристики.

Расчет для КЛ до ТП-2.

«Наибольший ток линии:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot n}, \quad (22)$$

где S_p – нагрузка участка, кВА;

n – число цепей, шт.

Экономическое сечение жил:

$$F_{\text{эк}} = \frac{I_p}{j_{\text{эк}}}, \quad (23)$$

где $j_{\text{эк}}$ – экономическая плотность тока, А/мм²» [11].

$$I_p = \frac{1900,05}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 2} = 54,8 \text{ А},$$

$$I_{\text{ав}} = \frac{1900,05}{\sqrt{3} \cdot 10} = 109,7 \text{ А},$$

$$F_{\text{эк}} = \frac{54,8}{1,4} = 39 \text{ мм}^2.$$

С поправкой на аварийный ток выбирается кабель АПвП 3×50 мм²,
 $I_{\text{дон}} = 119 \text{ А}$ [17].

Выбор кабелей 10 кВ сведен в таблицу 10.

Таблица 10 – Выбор кабелей 10 кВ

Участок	I _{ав} , А	Сечение жил, мм ²	I _{доп} , А
ГПП-ТП-2	109,7	50	119
ТП-5-ТП-3	26,5	16	64
ГПП-ТП-12	176,0	120	204
ГПП-ТП-15	73,3	25	77
ТП-15-ТП-10	43,9	16	64
ГПП-ТП-13	105,8	50	119
ТП-13-ТП-8а	62,8	25	77
ТП-8а-ТП-8	17,1	16	64
ГПП-ТП-6	27,9	16	64
ГПП-ТП-14	8,0	16	64
ГПП-ТП-5	45,8	16	64
ТП-10-ТП-11	16,7	16	64
ГПП-ТП-9	29,3	16	64
ГПП-РУ-1	93,8	35	98
ГПП-РУ-2	69,3	25	77

«Потери напряжения в линии:

$$\Delta U_{л} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_p \cdot L \cdot 100}{U_n} (r_0 \cdot \cos \varphi + x_0 \cdot \sin \varphi), \quad (24)$$

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 ПУЭ, потери напряжения не должны превышать 5 %»

[2].

Для КЛ до ТП-2:

$$\Delta U_{\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot 109,7 \cdot 0,593 \cdot 100}{10000} (0,63 \cdot 0,787 + 0,09 \cdot 0,616) = 0,19 \% < 5 \%$$

Проверка КЛ 10 кВ сведена в таблицу 11.

Таблица 11 – Проверка КЛ 10 кВ

Участок	Fст, мм ²	L, км	ΔU, %
ГПП-ТП-2	50	0,593	0,19
ТП-5-ТП-3	16	0,037	0,07
ГПП-ТП-12	120	0,385	0,61
ГПП-ТП-15	25	0,745	0,78
ТП-15-ТП-10	16	0,122	0,36
ГПП-ТП-13	50	0,015	0,04
ТП-13-ТП-8а	25	0,157	0,42
ТП-8а-ТП-8	16	0,035	0,04
ГПП-ТП-6	16	0,620	0,58
ГПП-ТП-14	16	0,398	0,21
ГПП-ТП-5	16	0,192	0,60
ТП-10-ТП-11	16	0,034	0,04
ГПП-ТП-9	16	0,881	0,87
ГПП-РУ-1	35	0,624	0,90
ГПП-РУ-2	25	0,385	0,57

Защита КЛ 10 кВ будет осуществляться микропроцессорными терминалами релейной защиты (РЗ).

Выбор кабеля 0,4 кВ до РП1.

Расчётный ток, по (22):

$$I_p = \frac{199,86}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 303,7 \text{ А}$$

Принимаем кабель АВБШв 4×150 мм², $I_{доп} = 335 \text{ А}$ [17].

Потери напряжения в КЛ, по (24):

$$\Delta U_{л} = \frac{\sqrt{3} \cdot 303,7 \cdot 0,081 \cdot 100}{380} (0,206 \cdot 0,812 + 0) = 0,85 \% < 5 \%$$

«Потери напряжения не превышают допустимые 5%.

Защита КЛ 0,4 кВ будет осуществляться автоматическими выключателями, выбор проводится по номинальному напряжению и максимальному току линий» [2].

Выбор кабелей 0,4 кВ и аппаратов защиты линий сведен в таблицу 12.

Таблица 12 – Выбор кабелей 0,4 кВ и аппаратов защиты линий

КЛ	I_p , А	Сечение АВБШв, мм ²	$I_{доп}$, А	ΔU , %	Марка авт. выключателя
ТП6-РП1	303,7	4×150	335	0,85	ВА-52-39 (320 А)
ТП3-РП4	17,9	4×4	42	0,91	ВА-51-25 (20 А)
РП10-РП7	27,6	4×4	42	0,81	ВА-51-25 (32 А)

Для выбора электрооборудования ГПП также требуется рассчитать токи короткого замыкания.

2.7 Расчет токов короткого замыкания

Расчёт токов короткого замыкания в сети предприятия играет важную роль в обеспечении надёжности и безопасности работы электрической

системы. Он позволяет определить возможные повреждения и оценить их последствия, подобрать соответствующее оборудование и проверить его на термическую и электродинамическую устойчивость, а также проверить работоспособность защитных устройств. Расчёт проводится с учётом действительных режимов работы и характеристик элементов систем электроснабжения. При расчёте токов короткого замыкания используются два основных метода: метод относительных единиц и метод именованных единиц. Первый метод применяется в электрических сетях с несколькими ступенями трансформации, а второй – для определения токов короткого замыкания в конкретной точке сети.

«Схема электрической сети и схема замещения для расчета токов КЗ приведены на рисунке 5.

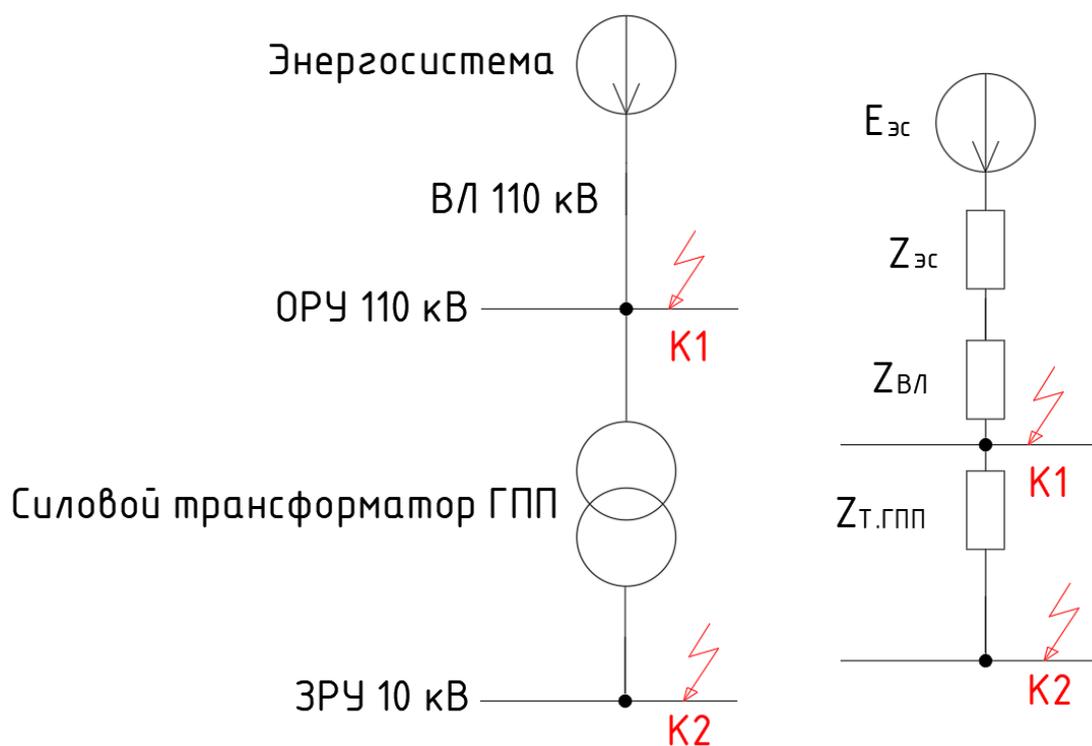


Рисунок 5 – Схема электрической сети и схема замещения

Полное сопротивление цепи КЗ:

$$z = \sqrt{\left(\sum r^{\circ}\right)^2 + \left(\sum x^{\circ}\right)^2}, \quad (25)$$

где $\sum r^{\circ}$, $\sum x^{\circ}$ – активное и индуктивное сопротивления цепи, Ом.

Сопротивления трансформаторов:

$$R_m = \Delta P_{\kappa} \cdot U_{н.в.}^2 / (S_n^2 \cdot 1000), \quad (26)$$

где ΔP_{κ} – потери КЗ, кВт;

$U_{н.в.}$ – напряжение ВН, кВ;

S_n – номинальная мощность, кВА.

$$Z_m = \Delta U_{\kappa} / 100 \cdot 10^2 / S_n, \quad (27)$$

где ΔU_{κ} – потери напряжения КЗ, %.

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2} \quad (28)$$

Токи трехфазного и двухфазного КЗ:

$$I_{\kappa 3}^{(3)} = \frac{U_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot z}, \quad (29)$$

$$I_{\kappa 3}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\kappa 3}^{(3)}. \quad (30)$$

Ударный ток КЗ:

$$I_y = I_{\kappa 3}^{(3)} \cdot \sqrt{1 + 2(\kappa_y - 1)^2}, \quad (31)$$

где κ_y – ударный коэффициент.

$$\kappa_y = 1 + e^{\frac{0,01}{T_a}}, \quad (32)$$

где T_a – постоянная аperiodической слагающей, с.

$$T_a = \sum X / 314 \sum R \quad (33)$$

Сопротивление энергосистемы:

$$X_c = \frac{U_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{к.эс}}}, \quad (34)$$

где $I_{\text{к.эс}}$ – трехфазный ток КЗ в начале ВЛ 110 кВ, кА» [13].

$$X_c = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 10,115} = 6564 \text{ мОм}$$

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

Сопротивления трансформаторов ГПП, по (26-28):

$$R_m = \frac{60000 \cdot 115^2}{10000^2} \cdot (10,5 / 115)^2 = 66 \text{ мОм},$$

$$Z_m = \frac{10,5 \cdot 115^2}{100 \cdot 10^2} \cdot (10,5 / 115)^2 = 1158 \text{ мОм},$$

$$X_m = \sqrt{1158^2 - 66^2} = 1156 \text{ мОм}.$$

Сопротивления ВЛ 110 кВ:

$$R_{\text{вл}} = 0,429 \cdot 13 \cdot \left(\frac{10,5}{115}\right)^2 = 23 \text{ мОм},$$

$$X_{\text{вл}} = 0,444 \cdot 13 \cdot \left(\frac{10,5}{115}\right)^2 = 24 \text{ мОм}.$$

Эквивалентные сопротивления цепи:

$$\Sigma r = R_{БЛ} + R_{м.ГПП}, \quad (35)$$

$$\Sigma r = 23 + 66 = 89 \text{ МОм},$$

$$\Sigma x = X_C + X_{БЛ} + X_{м.ГПП}, \quad (36)$$

$$\Sigma x = 6564 + 24 + 1156 = 7744 \text{ МОм},$$

$$z = \sqrt{89^2 + 7744^2} = 7745 \text{ МОм}.$$

По формулам (29–33):

$$I_{кз}^{(3)} = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 7745} = 8,573 \text{ кА},$$

$$T_a = 7744 / (314 \cdot 89) = 0,2759,$$

$$k_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,2759}} = 1,964,$$

$$I_y = 8,573 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1,964 - 1)^2} = 14,499 \text{ кА},$$

$$I_{кз}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 8,573 = 7,425 \text{ кА}.$$

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

Таблица 13 – Результаты расчетов токов КЗ

Место КЗ	$I_{к}^{(3)}$, кА	I_y , кА	$I_{к}^{(2)}$, кА
Точка К1	8,573	14,499	7,425
Точка К2	10,078	17,328	8,728

Оборудование электрической части главной понизительной подстанции выбирается с учетом данных значений токов КЗ.

2.8 Выбор оборудования электрической части главной понизительной подстанции

Оборудование электрической части ГПП включает силовые трансформаторы, коммутационные аппараты, измерительные приборы, устройства защиты и автоматики, а также вспомогательное оборудование. «Коммутационные аппараты используются для включения и отключения силовых трансформаторов, а также для коммутации электрических цепей» [20]. К ним относятся высоковольтные выключатели, разъединители и заземлители. Измерительные приборы предназначены для контроля параметров электрической сети, таких как напряжение, ток, мощность и частота. «Они включают амперметры, вольтметры, ваттметры и частотомеры. Устройства защиты и автоматики обеспечивают безопасность работы ГПП и защищают оборудование от перегрузок, коротких замыканий и других аварийных ситуаций» [12]. К ним относятся реле максимального тока, реле минимального напряжения, дифференциальные реле и другие защитные устройства. Таким образом, оборудование электрической части ГПП представляет собой комплекс различных устройств и аппаратов, которые совместно обеспечивают преобразование, распределение и учёт электроэнергии, а также защиту оборудования от аварийных ситуаций.

«Условия выбора выключателей:

$$U_{ном} \geq U_{раб}, \text{ кВ}, \quad (37)$$

$$I_{ном} \geq I_{раб}, \text{ кВ}, \quad (38)$$

$$I_{ном.откл} \geq I_k, \text{ кА}, \quad (39)$$

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

I_k – ток трехфазного КЗ, кА.

$$i_{пр.с} \geq i_y, \text{ кА}, \quad (40)$$

где $i_{np.c}$ – сквозной ток КЗ, кА;

i_y – ударный ток КЗ, кА.

$$I_m^2 \cdot t_m \geq B_k, \text{ кА}^2 \cdot \text{с}, \quad (41)$$

где I_m – ток термической стойкости, кА;

t_m – время протекания тока, с;

B_k – тепловой импульс, кА²·с.

Условия выбора разъединителей» [12]:

$$U_{н.анн.} \geq U_{н.уст.}, \quad (42)$$

$$I_{н.анн.} \geq I_{раб.макс.}, \quad (43)$$

$$I_{мер.}^2 \cdot t_{мер.} \geq B_k, \quad (44)$$

$$i_{дин} \geq i_y. \quad (45)$$

Выбор выключателей и разъединителей сведен в таблицу 14.

Таблица 14 – Выбор высоковольтных выключателей и разъединителей

Параметры	ОРУ			ЗРУ	
	По расчету	По паспорту, ВГУ-110-40/3150	По паспорту, РНДЗ-110/1000	По расчету	По паспорту, ВВ/TEL-10/630
$U_{ном}$, кВ	110	110	110	10	10
$I_{ном}$, А	52,2	3150	2000	565,52	630
$I_{н.откл.}$, кА	10,078	40	20	8,573	20
B_k , кА ² ·с	12,7	4800	1200	9,2	1200
$i_{дин}$, кА	17,328	102	40	14,499	20

Выбор ОПН. Ограничители перенапряжений (ОПН) – это специальные устройства, предназначенные для защиты электрических сетей и оборудования от опасных воздействий перенапряжений. Они представляют собой варисторы, работающие на основе нелинейного сопротивления, которое изменяется при изменении приложенного напряжения.

«ОПН применяются в различных областях электротехники, таких как энергетика, промышленность, транспорт и коммунальное хозяйство. Они обеспечивают надёжную защиту от грозových и коммутационных перенапряжений, а также от других видов электрических воздействий, способных вызвать повреждение оборудования и нарушение электроснабжения» [11].

Принцип работы ограничителей перенапряжений основан на их способности быстро изменять своё сопротивление в зависимости от величины приложенного напряжения. При возникновении перенапряжения ОПН резко уменьшает своё сопротивление, что приводит к шунтированию нагрузки и быстрому рассеиванию энергии перенапряжения в виде тепла.

«Принимаются к установке ограничители перенапряжения серии ОПН. Для защиты трансформатора со стороны 110 кВ устанавливаются ОПН-110/88/10/450-У1. Со стороны 10 кВ устанавливаются ОПН-10/11,5-10/400-У1» [7].

Выбор измерительных трансформаторов. Трансформаторы тока (ТТ) и напряжения (ТН) – важные элементы в электротехнике, которые выполняют различные функции. Трансформаторы напряжения используются для отделения первичных цепей высокого напряжения и цепей измерений, защиты и автоматики, а также для понижения высоких напряжений до стандартных значений [20]. Они позволяют изолировать маломощные низковольтные измерительные приборы и устройства, обеспечивая безопасность обслуживания электроустановок. Трансформаторы тока предназначены для трансформирования величин токов до величин, необходимых для подключения приборов измерения и устройств релейной

защиты и автоматики. Они также обеспечивают безопасность производства работ, разделяя цепи высокого и низкого напряжения и упрощая конструкцию дорогостоящих измерительных приборов и реле.

«Согласно напряжениям в местах установки и полученным расчетным токам принимаются к установке следующие трансформаторы тока» [12]:

- на фидерах 10 кВ: ТПЛК10 – 10...200/5;
- на вводах ЗРУ 10 кВ: ТПЛК10 – 600/5;
- на ОРУ 110 кВ: ТФНД-110 – 75/5.

Проверка ТТ в режиме КЗ:

- в ЗРУ 10 кВ:

По динамической стойкости: $i_{дин} = 74,5 \text{ кА} \geq i_{уд} = 14,499 \text{ кА}$.

По термической стойкости: $I_m^2 \cdot t_m = 2900 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \geq B_k = 9,2 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$.

- на ОРУ 110 кВ:

$i_{дин} = 42 \text{ кА} \geq i_{уд} = 17,328 \text{ кА}$,

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

«Условия выбора трансформаторов напряжения (ТН)» [12]:

$$U_{ном} \geq U_{уст},$$

$$S_{ном} \geq S_{2\Sigma}.$$

Принимаются к установке ТН типа НАМИ-10-200.

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

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

ТТ и ТН проходят проверку.

Выбор ячеек КРУ. «Комплектные распределительные устройства (КРУ) представляют собой систему агрегатов, предназначенных для приёма и распределения электроэнергии, а также обеспечения питания электроустановок. Они отличаются от типовых трансформаторных подстанций своими размерами и скоростью монтажа. Всё электрооборудование КРУ интегрировано в полностью или частично

закрытые камеры и поставляется заказчику в собранном виде. Преимущества комплектных распределительных устройств включают снижение трудозатрат и упрощение процесса монтажа, повышенную надёжность системы, возможность быстрого подключения дополнительных элементов и силовых кабелей благодаря просторной камере, встроенную блокировку для защиты системы от ошибок обслуживающего персонала и использование современных комплектующих, обеспечивающих долговечность, эффективность и простоту обслуживания» [8].

Выбираются КРУ марки КРУ2-10М на номинальный ток 630 А, внешний вид показан на рисунке 6.



Рисунок 6 – Ячейка КРУ

Преимущества КРУ:

- удобство монтажа и обслуживания;
- эффективное распределение электроэнергии;
- защита электрооборудования;
- экономия места и ресурсов.

Микропроцессорная релейная защита (РЗ) будет обеспечивать защиту силовых трансформаторов и фидеров 10 кВ на ГПП.

Микропроцессорная релейная защита – это современное решение для обеспечения безопасности и надёжности работы электроустановок. Она основана на использовании микроконтроллеров и компьютерных технологий, что позволяет отказаться от громоздких электромеханических и статических реле [1]. Преимущества микропроцессорных устройств релейной защиты включают компактность, наглядность управления, реализацию дополнительных функций, таких как регистрация аварийных состояний, опережение отключения синхронных потребителей и дальнейшее резервирование. В процессе эксплуатации микропроцессорных систем релейной защиты были выявлены как преимущества, так и недостатки. Однако развитие технологий продолжает улучшать эти устройства, делая их всё более эффективными и многофункциональными [6], [10].

Предлагается использовать терминалы РЗА производства ООО «Релематика»:

- РЗ силовых трансформаторов: терминалы TOP 200 Т-16;
- РЗ фидеров 10 кВ: терминалы TOP 150.

Преимущества выбранных терминалов РЗ:

- отечественное производство и элементная база;
- надёжный поставщик и производитель;
- хорошая эргономика и интуитивно понятное программное обеспечение;
- относительно низкая цена.

Внешний вид терминала TOP 200 Т-16 показан на рисунке 7.



Рисунок 7 – Терминал TOP 200 T-16

Внешний вид терминала TOP 150 показан на рисунке 8.



Рисунок 8 – Терминал TOP 150

Уставки защит задаются программно.

2.9 Автоматизированная система технического учёта электрической энергии, реализация АСТУЭ

«АСТУЭ (автоматизированная система технического учёта электрической энергии) предназначена для снижения финансовых затрат на производство продукции, анализа расхода и выбора оптимальных режимов потребления энергоресурсов. Система состоит из следующих уровней: приборы учёта, устройства сбора, хранения и передачи данных, коммуникационное оборудование и центральный сервер с программным обеспечением» [13]. АСТУЭ позволяет контролировать технические параметры, архивировать информацию, разграничивать доступ к функциям и автоматически формировать отчётность.

АСТУЭ на предприятии будет реализована на основе оборудования от АО «Концерн Энергомера». Точки учета электроэнергии (счетчики СЕ 303) устанавливаются на шинах и фидерах 10 кВ ГПП, а также на фидерах 0,4 кВ цеховых ТП и вводах энергоёмких электроприемников. Счетчики подключаются к устройствам сбора и передачи данных (УСПД) СЕ805М через концентраторы RS-485 по протоколу Modbus. В качестве центра обработки данных АСТУЭ будет использоваться центральный сервер предприятия.

2.10 Заземляющие устройства цеховых подстанций

Система заземления электрической сети играет важную роль в обеспечении безопасности и защите от поражения электрическим током. Она состоит из совокупности заземляющего устройства подстанции, заземляющего устройства открытых проводящих частей потребителя и нейтрального (иногда фазного) проводника в электроустановке. Заземление обеспечивает преднамеренное электрическое соединение какой-либо точки сети, электроустановки или оборудования с заземляющим устройством. Оно

является одним из основных способов защиты от поражения электрическим током и обязательным элементом электроснабжения любого объекта.

Расчет заземляющего устройства цеховых ТП.

Эквивалентное сопротивление ЗУ на стороне 0,4 кВ не должно превышать 4 Ом [16].

«Удельное сопротивление грунта для электродов:

$$\rho_p = \rho \cdot K_c, \quad (46)$$

где ρ – удельное сопротивление грунта, Ом · м;

K_c – коэффициент сезонности.

$$\rho_{pe} = 400 \cdot 1,1 = 440 \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

$$\rho_{pe} = 400 \cdot 1,4 = 560 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Для вертикальных электродов (ВЭ) используем угловую сталь 50x50 мм, для горизонтального электрода (ГЭ) – полосовую сталь 50x5 мм.

Сопротивление растеканию для одного ВЭ:

$$R_{овэ} = \frac{\rho_{pe}}{2 \cdot \pi \cdot l} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot l}{d} \right) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot t + l}{4 \cdot t - l} \right) \right], \quad (47)$$

где l – длина ВЭ, м;

d – приведенный диаметр, м;

t – расстояние от поверхности до центра ВЭ, м.

$$d = 0,95 \cdot b, \quad (48)$$

где b – ширина уголка, м» [15].

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

$$t = 3 / 2 + 0,8 = 2,3 \text{ м},$$

$$R_{\text{овз}} = \frac{440}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot 3}{0,0475} \right) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot 2,3 + 3}{4 \cdot 2,3 - 3} \right) \right] = 62,405 \text{ Ом.}$$

«Расчетное число ВЭ:

$$n' = R_{\text{овз}} / R_n, \quad (49)$$

где R_n – допустимое сопротивление ЗУ, Ом» [15].

$$n' = 62,405 / 4 \approx 16 \text{ шт}$$

«Длина ГЭ:

$$l_z = 1,05 \cdot a \cdot n', \quad (50)$$

где a – расстояние между ВЭ, м.

$$a = l_{\text{пер}} / n', \quad (51)$$

где $l_{\text{пер}}$ – периметр здания ТП, м» [15].

$$l_{\text{пер}} = 2 \cdot (7,3 + 6,5) = 27,6 \text{ м,}$$

$$a = 27,6 / 16 = 1,73 \text{ м,}$$

$$l_z = 1,05 \cdot 1,73 \cdot 16 = 28,98 \text{ м.}$$

Монтаж системы заземления – ответственный процесс, который требует соблюдения всех норм и правил безопасности. Правильно смонтированная система заземления обеспечит надёжную работу электрооборудования и защитит людей и животных от поражения электрическим током.

«План заземления ТП показан на рисунке 9.

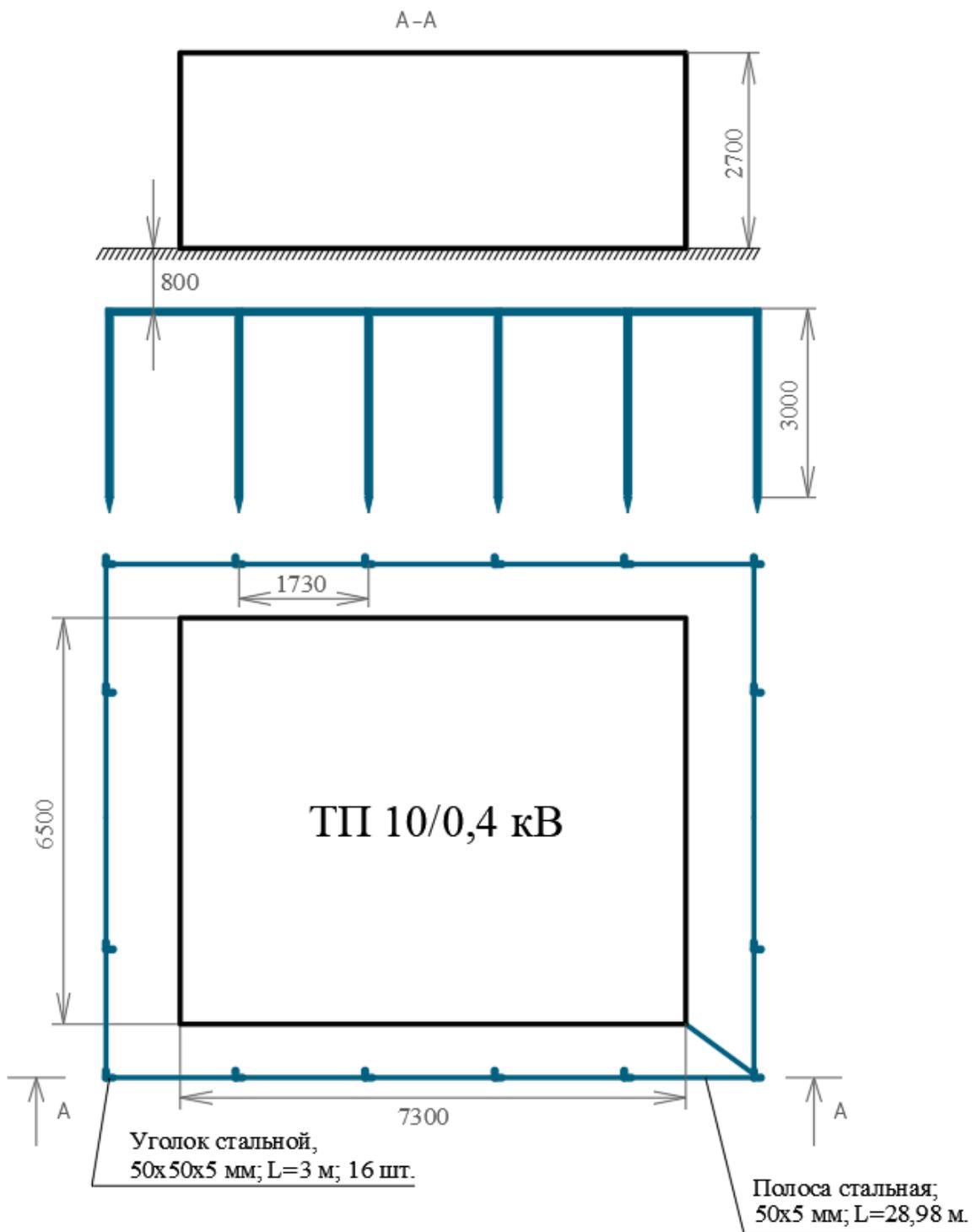


Рисунок 9 – План заземления цеховых подстанций

Сопротивление растеканию ГЭ:

$$R_{\text{эз}} = \frac{\rho_{\text{пз}}}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left(\frac{l^2}{d \cdot t} \right), \quad (52)$$

$$d = 0,5 \cdot b, \quad (53)$$

где b – ширина полосы, м» [15].

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

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

$$R_{23} = \frac{560}{2 \cdot 3,14 \cdot 28,98} \cdot \ln \left(\frac{28,98^2}{0,025 \cdot 0,825} \right) = 2,911 \text{ Ом}.$$

«Сопротивление ЗУ:

$$R_{zp} = \frac{R_{огэ} \cdot R_{23}}{R_{огэ} \cdot \eta_6 \cdot n + R_{23} \cdot \eta_2}, \quad (54)$$

где η_6 , η_2 – коэффициенты использования ВЭ и ГЭ» [15].

$$R_{zp} = \frac{62,405 \cdot 2,911}{62,405 \cdot 0,51 \cdot 16 + 2,911 \cdot 0,3} = 3,704 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом}$$

2.11 Заземляющее устройство главной понизительной подстанции

Заземляющее устройство главной понизительной подстанции играет важную роль в обеспечении безопасности и надёжности работы электрической системы. При выборе заземляющего устройства учитываются требования по наименьшей допустимой величине, а также режим нейтрали подстанции. Расчёт заземляющего устройства проводится по допустимому сопротивлению растекания тока.

«На стороне 110 кВ режим работы нейтрали сети – эффективно заземленная, максимально допустимое сопротивление ЗУ 0,5 Ом» [15].

По формулам (47-54):

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

$$t = 3,5 / 2 + 0,8 = 2,55 \text{ м,}$$

$$R_{\text{огз}} = \frac{440}{2 \cdot 3,14 \cdot 3,5} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot 3,5}{0,0475} \right) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot 2,55 + 3,5}{4 \cdot 2,55 - 3,5} \right) \right] = 26,402 \text{ Ом,}$$

$$n' = 26,402 / 0,5 \approx 53 \text{ шт,}$$

$$l_{\text{неп}} = 2 \cdot (66 + 31) = 194 \text{ м,}$$

$$a = 194 / 53 = 3,66 \text{ м,}$$

$$l_2 = 1,05 \cdot 3,66 \cdot 53 = 204 \text{ м,}$$

$$R_{\text{эз}} = \frac{560}{2 \cdot 3,14 \cdot 204} \cdot \ln \left(\frac{204^2}{0,025 \cdot 0,825} \right) = 0,301 \text{ Ом,}$$

$$R_{\text{зп}} = \frac{26,402 \cdot 0,301}{26,402 \cdot 0,42 \cdot 53 + 0,301 \cdot 0,25} = 0,427 \text{ Ом} \leq 0,5 \text{ Ом.}$$

Сопrotивление ЗУ обеспечит надежную и безопасную эксплуатацию оборудования.

Вывод по разделу. Рассчитаны ожидаемые электрические нагрузки по отдельным зданиям и всему предприятию. Рассчитана и построена картограмма нагрузок, выбрано место расположения ГПП. ГПП будет установлена за территорией, с учетом розы ветров и направления подхода питающей ЛЭП. Составлен план прокладки кабельных линий. С учетом рабочих и аварийных режимов выбрано современное оборудование СЭС отечественных производителей и поставщиков. Рассчитаны заземляющие устройства цеховых подстанций и главной понизительной подстанции.

Заключение

Выполнено проектирование системы электроснабжения металлообрабатывающего предприятия, учтены актуальные современные требования по обеспечению безопасности и надежности электроснабжения, а также энергосбережению. Данный промышленный объект планируется к постройке в связи с расширением объемов выполняемых работ, а также растущим спросом рынка на продукцию в виде металлических конструкций и изделий различных типов и назначения. Ввод в эксплуатацию данного предприятия позволит обеспечить внутренние потребности рынка, а также увеличить прибыль государства путем продажи части продукции на отечественном и зарубежном рынках. Определены ожидаемые электрические нагрузки по отдельным зданиям и предприятию в целом, построена картограмма нагрузок, выбрано место расположения главной понизительной подстанции, которая будет установлена за территорией, с учетом розы ветров и направления подхода питающей высоковольтной линии. Составлен план кабельных трасс на территории предприятия, выбрана смешанная схема распределительной сети как наиболее оптимальная и адаптированная по данные конкретные условия применения и наиболее выгодная. по результатам расчетов рабочих и аварийных режимов выбрано современное оборудование системы электроснабжения, отечественных производителей и поставщиков. Автоматический технический учет электроэнергии будет обеспечиваться АСТУЭ с оборудованием от АО «Концерн Энергомера», что обеспечит оптимизацию электропотребления и максимальную энергоэффективность производственных процессов. Рассчитаны заземляющие устройства цеховых подстанций и главной понизительной подстанции. Применение разработанной СЭС обеспечит качественное и надежное электроснабжение предприятия.

Список используемых источников

1. Бирюлин В. И. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 164 с.
2. Бирюлин В. И. Электроснабжение промышленных и гражданских объектов : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 204 с.
3. Галишников Ю. П. Трансформаторы и электрические машины : курс лекций. М. : Инфра-Инженерия, 2021. 216 с.
4. Голов Р. С. Управление энергосбережением на промышленном предприятии : монография. М. : Дашков и К, 2023. 458 с.
5. Головатый С. Е. Охрана окружающей среды и энергосбережение : учебное пособие. Минск : РИПО, 2021. 304 с.
6. Горемыкин С. А. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем : учебное пособие. М. : ИНФРА-М, 2023. 191 с.
7. Гуревич В. И. Защита оборудования подстанций от электромагнитного импульса : учебно-практическое пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2023. 304 с.
8. Дубинский Г. Н. Наладка устройств электроснабжения напряжением выше 1000 В : учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. М. : СОЛОН-Пресс, 2020. 538 с.
9. Иванов С. Н. Надежность электроснабжения : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 164 с.
10. Куксин А. В. Релейная защита электроэнергетических систем : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2021. 200 с.
11. Куксин А. В. Электроснабжение промышленных предприятий : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2021. 156 с.

12. Малафеев А. В. Проектирование электрической части понизительных подстанций промышленного предприятия : учебное пособие. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 312 с.
13. Ополева Г. Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов: Учебное пособие. М. : Форум, 2022. 416 с.
14. Петухов Р. А. Электроснабжение : учебное пособие. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2022. 328 с.
15. Полуянович Н. К. Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий. СПб. : Лань, 2023. 396 с.
16. Правила устройства электроустановок: действующие разделы 6-го и 7-го изданий. М. : ИНФРА-М, 2023. 832 с.
17. Сибикин М. Ю. Справочник электрика по ремонту электрооборудования промышленных предприятий. 2-е изд., доп. М. : ИНФРА-М, 2023. 262 с.
18. Шеховцов В. П. Осветительные установки промышленных и гражданских объектов : учебное пособие. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2022. 158 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.