

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 завода по производству малогабаритных трансформаторов в  
г. Санкт-Петербург

Обучающийся

М.Ю. Дубонос

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент Д.А. Кретов

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

Тольятти 2024

## Аннотация

Выпускная квалификационная работа 59 страниц, 9 рисунков, 14 таблиц, 20 источников.

Ключевые слова: электроснабжение, предприятие, завод, потребитель, оборудование, нагрузка, линия, заземление.

Актуальность разработки: ввод в эксплуатацию планируемого к постройке завода по производству малогабаритных трансформаторов в г. Санкт-Петербург требует обеспечения качественного электроснабжения. Грамотно спроектированная и правильно реализованная система электроснабжения завода обеспечит стабильность производственных процессов и высокое качество продукции. В целом, разработка системы электроснабжения актуальна, потому что ее грамотное проектирование влияет на расходы предприятия, бесперебойность работы оборудования и соблюдение требований безопасности. Система электроснабжения должна соответствовать критериям сбалансированной нагрузки, безопасности, простоты схемы и возможности модернизации.

Цель работы: разработка качественного и надежного электроснабжения завода.

Содержание ВКР включает в себя вопросы: общая характеристика предприятия и исходные данные на проектирование; разработка системы электроснабжения предприятия; определение токов короткого замыкания; выбор и проверка электрооборудования ГПП, выбор оборудования релейной защиты и автоматики, заземление цеховых подстанций и ГПП.

## Содержание

Введение.....	4
1 Исходные данные .....	7
1.1 Общая характеристика предприятия.....	7
1.2 Исходные данные на проектирование .....	8
2 Разработка системы электроснабжения предприятия.....	11
2.1 Расчет электрических нагрузок .....	11
2.2 Картограмма нагрузок, выбор места расположения ГПП .....	15
2.3 Выбор силовых трансформаторов цеховых подстанций .....	19
2.4 Компенсация реактивной мощности, выбор и проверка силовых трансформаторов ГПП.....	23
2.5 Выбор схемы внутриводского электроснабжения .....	28
2.6 Выбор кабелей и аппаратов защиты линий.....	29
2.7 Определение токов короткого замыкания.....	33
2.8 Выбор и проверка электрооборудования ГПП .....	37
2.9 Выбор оборудования релейной защиты и автоматики .....	41
2.10 Заземление цеховых ТП и ГПП .....	53
Заключение .....	57
Список используемых источников.....	58

## Введение

Электроснабжение промышленных предприятий (ПП) играет важную роль в обеспечении непрерывности и эффективности производственных процессов. Грамотное проектирование и организация системы электроснабжения влияют на расходы, связанные с производством продукции, и на бесперебойную работу оборудования. Особенности электроснабжения производственных площадок включают сбалансированную нагрузку, безопасность для пользователей, простоту схемы и возможность модернизации, а также бесперебойность работы. Элементы системы электроснабжения (СЭС) предприятий включают источник электроэнергии, питающую сеть и многочисленные пункты приёма и распределительные линии, передающие электроэнергию к приёмникам (потребителям энергии). При выборе схемы электропитания учитываются особенности ПП, такие как влажность, запылённость, пожарная и взрывная опасность. Рациональная схема электроснабжения должна обеспечивать надёжность и устойчивость к нагрузкам, а также поддерживать подключение нового оборудования при необходимости.

Производство малогабаритных трансформаторов является важной задачей отечественной и общемировой промышленности. «Малогабаритные трансформаторы, в качестве преобразователей первичных величин тока и напряжения, применяются повсеместно во всех сферах народного хозяйства и производственных отраслях, в различных типах и видах оборудования» [4]. По мере развития экономики страны, возрастает и потребность в расширении объемов производства малогабаритных трансформаторов различных типов и назначения, для выпуска которых строятся и вводятся в эксплуатацию новые заводы и иные производственные объекты. Современное производство малогабаритных трансформаторов является высокоавтоматизированной высокотехнологичной отраслью промышленности, требующей качественного и надежного электроснабжения согласно требованиям актуальных

нормативных и технических документов. Требования к системе электроснабжения предприятия включают сбалансированную нагрузку, безопасность для пользователей, простоту схемы, возможность модернизации и бесперебойность работы. Эти требования отражены в специальных нормах и правилах, регулирующих электроснабжение ПП. Проектирование СЭС предприятий должно осуществляться опытными инженерами, учитывающими предстоящие нагрузки, оптимальное напряжение, конструкцию оборудования и структуру сети. В данной работе проводится разработка СЭС завода по производству малогабаритных трансформаторов в г. Санкт-Петербург. Данный промышленный объект планируется к постройке ООО «Энерготехсервис», в связи с расширением объемов выполняемых работ, а также растущим спросом рынка на продукцию в виде малогабаритных силовых и измерительных трансформаторов. Ввод в эксплуатацию данного завода позволит обеспечить внутренние потребности предприятия в данном типе электрооборудования, а также увеличить свою прибыль путем продажи части продукции на отечественном и зарубежном рынках.

Актуальность разработки: ввод в эксплуатацию планируемого к постройке завода по производству малогабаритных трансформаторов в г. Санкт-Петербург требует обязательного обеспечения качественного, безопасного и надежного электроснабжения производственных участков (ПУ) и промышленного оборудования. Грамотно спроектированная и правильно реализованная система электроснабжения завода 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. Предложенный проект системы электроснабжения будет использоваться для питания производственных

участков и предприятия в целом. Будет обеспечено качественное и надежное электроснабжение производственных участков и промышленного высокоточного оборудования с электронным управлением, что позволит организовать бесперебойный автоматизированный производственный процесс.

Цель работы: разработка качественного и надежного электроснабжения завода.

Задачи работы:

- систематизировать исходные данные на проектирование;
- выполнить расчет электрических нагрузок;
- построить картограмму нагрузок, выбрать место расположения главной понизительной подстанции (ГПП);
- выбрать силовые трансформаторы цеховых подстанций;
- рассчитать компенсацию реактивной мощности (КРМ), выбрать силовые трансформаторы ГПП;
- провести выбор схемы внутризаводского электроснабжения, кабелей и аппаратов защиты линий;
- определить токи короткого замыкания (КЗ);
- выбрать электрооборудование ГПП;
- выбрать оборудование микропроцессорной релейной защиты и автоматики (РЗА);
- рассчитать уставки РЗА;
- рассчитать заземляющие устройства цеховых трансформаторных подстанций (ТП) и ГПП.

Разработанная система электроснабжения завода должна соответствовать требованиям Правил устройства электроустановок (ПУЭ) и другим актуальным нормативно-техническим документам, регламентирующим правила разработки СЭС промышленных объектов.

## **1 Исходные данные**

### **1.1 Общая характеристика предприятия**

ООО «Энерготехсервис» представляет собой современное промышленное предприятие, основной вид деятельности – разработка и реализация проектов промышленных процессов и производств, относящихся к электротехнике на различных объектах, согласно требованиям заказчиков.

Завод по производству малогабаритных трансформаторов – это современное электротехническое предприятие, специализирующееся на выпуске силовых масляных трансформаторов малой мощности с обмотками круглого и прямоугольного сечения, расположенных в баках с гофрированными стенками и расширителями. В процессе производства используются высококачественные материалы и передовые технологии, а продукция проходит все необходимые испытания. Трансформаторы будут использоваться для собственных потребностей ООО «Энерготехсервис» при проведении различных выполняемых работ и для реализации различных проектов, а также поставляться в разные страны мира, включая Россию, Беларусь, Литву, Эстонию и другие. Они будут обладать высокими техническими характеристиками и эксплуатационной надёжностью. Проектирование и производство трансформаторов будет сертифицировано на соответствие требованиям государственных и международных стандартов. При необходимости заказа нестандартных трансформаторов предприятие будет разрабатывать индивидуальные решения в короткие сроки. Таким образом, завод будет предлагать качественную и конкурентоспособную продукцию, соответствующую мировым стандартам. Для минимизации уровня брака и обеспечения высокого качества продукции требуется разработать качественное электроснабжение завода.

## 1.2 Исходные данные на проектирование

Генплан предприятия показан на рисунке 1.

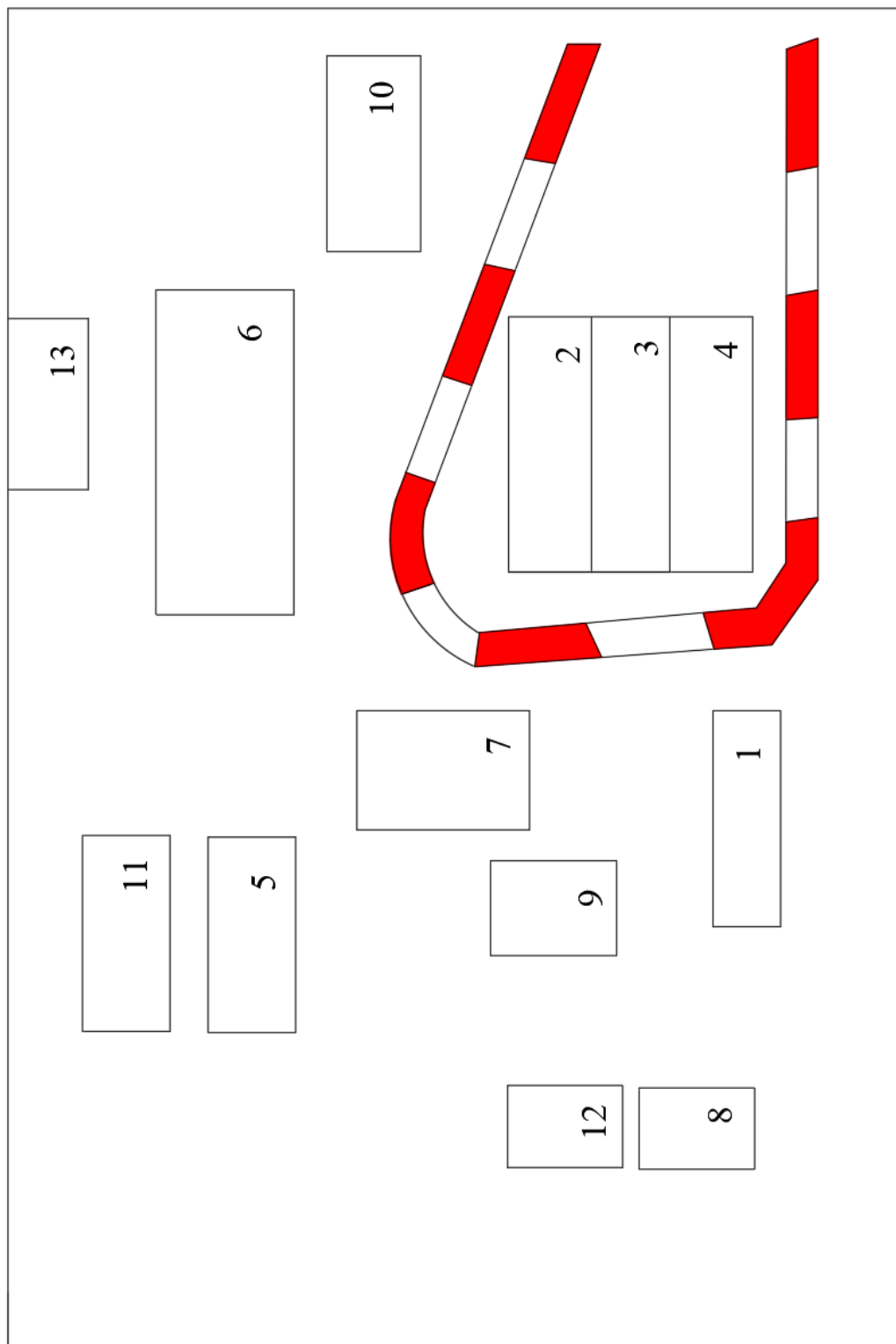


Рисунок 1 – Генплан предприятия



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

Таблица 1 – Производственные участки

Номер на генплане	Цеха	$\Sigma P_{\text{ном}}$ , кВт	$\cos\varphi$	$K_c$
1	Литейный цех	720	0,72	0,7
2	Заготовительно-сварочный цех	3820	0,65	0,5
3	Обмоточный цех	355	0,74	0,7
4	Изоляционный цех	1430	0,82	0,4
5	Лаковарочный цех	310	0,84	0,4
6	Сборочный цех	270	0,7	0,6
7	Аппаратный цех	920	0,72	0,4
8	Кислородная станция	295	0,65	0,3
9	Компрессорная: а) 0,38 кВ	135	0,8	0,7
	б) Синхр. двигатели 10 кВ	1100	0,8	0,7
10	Насосная	940	0,75	0,65
11	Испытательный цех	220	0,82	0,3
12	Кузнечный цех	1220	0,7	0,4
13	Заводоуправление	65	0,85	0,4

Источник питания ГПП завода – шины 110 кВ подстанции (ПС) энергосистемы, питание ГПП будет выполнено воздушной линией (ВЛ) с проводами АС-70/11, длина трассы ВЛ составит 19,6 км.

Категории надёжности электроснабжения цехов и других зданий приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Требования к надёжности электроснабжения ПУ

Участки	Категория.
Литейный цех	1
Заготовительно-сварочный цех	2
Обмоточный цех	2
Изоляционный цех	2
Лаковарочный цех	2
Сборочный цех	2
Аппаратный цех	2
Кислородная станция	2
Компрессорная	1
Насосная	1
Испытательный цех	2
Кузнечный цех	2
Заводоуправление	3

#### Вывод.

Приведена общая характеристика предприятия и его основной вид деятельности. Новый промышленный объект, завод по производству малогабаритных трансформаторов, планируется к постройке ООО «Энерготехсервис», для него требуется разработать качественную и надежную систему электроснабжения. Согласно проектной документации, составлен генеральный план завода, составлен перечень производственных участков и систематизированы данные по их электропотреблению. Приведены данные по источнику питания главной понизительной подстанции завода. Подготовлены все необходимые данные для разработки СЭС завода.

## 2 Разработка системы электроснабжения предприятия

### 2.1 Расчет электрических нагрузок

Расчёт электрических нагрузок завода – одна из ключевых задач при проектировании системы электроснабжения. От правильного определения нагрузок зависят технические характеристики элементов сети, выбор оборудования и эффективность производства. Нагрузки определяются исходя из среднегодовой мощности, действительных графиков нагрузок и потерь в сети и трансформаторах. Для упрощения расчётов и при разработке СЭС планируемых к постройке объектов используют коэффициенты мощности и спроса, которые позволяют оценить прогнозируемые активную и реактивную нагрузки. «Правильное определение электрических нагрузок обеспечивает экономически обоснованный выбор оборудования, средств компенсации реактивной мощности и устройств регулирования напряжения» [12]. Это также важно для обеспечения надёжности и безопасности работы электрической сети. В целом, расчёт электрических нагрузок завода – сложный процесс, требующий учёта множества факторов и использования различных методов расчёта. Однако правильное определение расчетных нагрузок позволяет обеспечить эффективное и безопасное функционирование системы электроснабжения предприятия [1].

«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» [12].

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

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

Пример расчета, участок №1, по (1-3):

$$P_c = 0,7 \cdot 720 = 504 \text{ кВт},$$

$$Q_c = 504 \cdot 0,964 = 485,78 \text{ квар},$$

$$S_c = \sqrt{504^2 + 485,78^2} = 700 \text{ кВА}.$$

Результаты расчетов сведены в таблице 3.

Таблица 3 – Нагрузки предприятия

Цеха	$\Sigma P_{\text{ном}}$ , кВт	$\operatorname{tg} \varphi$	$K_c$	Среднесменные нагрузки		
				$P_c$ , кВт	$Q_c$ , квар	$S_c$ , кВА
Литейный цех	720	0,964	0,7	504,00	485,78	700,00
Заготовительно-сварочный цех	3820	1,169	0,5	1910,00	2233,04	2938,46
Обмоточный цех	355	0,909	0,7	248,50	225,87	335,81
Изоляционный цех	1430	0,698	0,4	572,00	399,26	697,56
Лаковарочный цех	310	0,646	0,4	124,00	80,10	147,62
Сборочный цех	270	1,020	0,6	162,00	165,27	231,43
Аппаратный цех	920	0,964	0,4	368,00	354,70	511,11
Кислородная станция	295	1,169	0,3	88,50	103,47	136,15
Компрессорная 0,38 кВ	135	0,750	0,7	94,50	70,88	118,13
Компрессорная 10 кВ	1100	0,750	0,7	770,00	0,00	770,00
Насосная	940	0,882	0,65	611,00	538,85	814,67
Испытательный цех	220	0,698	0,3	66,00	46,07	80,49
Кузнечный цех	1220	1,020	0,4	488,00	497,86	697,14
Заводууправление	65	0,620	0,4	26,00	16,11	30,59
Итого	-	-	-	6032,50	5217,25	7975,63

«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/м<sup>2</sup>;

$K_{co}$  – коэффициент спроса освещения;

$F$  – площадь здания, м<sup>2</sup>.

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

Освещение обеспечивается современными светодиодными светильниками» [19].

Светодиоды, как источники света, обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными источниками света, такими как лампы накаливания и люминесцентные лампы. Они потребляют меньше электроэнергии, служат дольше и выделяют меньше тепла. Кроме того, обеспечивается высокая яркость и хорошая цветопередача, что делает их идеальным выбором для освещения. Применение светодиодных светильников на территории завода имеет ряд преимуществ. Они обеспечивают качественное освещение, что улучшает видимость и безопасность на территории. Это особенно важно для предотвращения аварий и обеспечения безопасности работников. Светодиодные светильники экономичны в использовании и потребляют меньше электроэнергии по сравнению с другими типами ламп, что позволяет снизить затраты на освещение. Это особенно актуально для крупных заводов с большим количеством осветительных приборов. Светодиодные светильники имеют длительный срок службы и могут работать до 50 000 часов без существенного снижения яркости, что значительно сокращает расходы на замену ламп и обслуживание системы освещения. В целом, светодиоды

обеспечивают качественное, экономичное и безопасное освещение, что делает их привлекательным вариантом для промышленных предприятий.

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

$$P_{po} = 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95 \cdot 1052,5 = 3,8 \text{ кВт},$$

$$Q_{po} = 3,8 \cdot 0,329 = 1,25 \text{ квар.}$$

С освещением, итого нагрузки ПУ №1:

$$P_p' = 504 + 3,8 = 507,8 \text{ кВт},$$

$$Q_p' = 485,78 + 1,25 = 487,03 \text{ квар},$$

$$S_p' = \sqrt{507,8^2 + 487,03^2} = 703,61 \text{ кВА.}$$

Расчетные нагрузки предприятия сведены в таблице 4.

Таблица 4 – Расчетные нагрузки предприятия

Участки	Pp', кВт	Qp', квар	Sp', кВА
Литейный цех	507,80	487,03	703,61
Заготовительно-сварочный цех	1915,14	2234,73	2943,09
Обмоточный цех	253,64	227,56	340,76
Изоляционный цех	577,14	400,95	702,74
Лаковарочный цех	128,56	81,60	152,27
Сборочный цех	173,76	169,14	242,49
Аппаратный цех	371,33	355,79	514,27
Кислородная станция	90,93	104,27	138,35
Компрессорная: а) 0,38 кВ	97,86	71,98	121,48
б) Синхр. двигатели 10 кВ	770,00	0,00	770,00
Насосная	616,23	540,57	819,73
Испытательный цех	70,61	47,58	85,15
Кузнечный цех	490,57	498,70	699,55

Продолжение таблицы 4

Участки	Pr', кВт	Qp', квар	Sp', кВА
Заводоуправление	29,88	17,39	34,57
∑ по цехам	6093,44	5270,88	8056,81
Территория	13,59	11,96	18,11
Итого	6107,03	5282,84	8074,92

Далее определяется оптимальное местоположение ГПП.

## 2.2 Картограмма нагрузок, выбор места расположения ГПП

«Картограмма электрических нагрузок – это метод графического отображения распределения нагрузок на территории промышленного предприятия. Она представляет собой размещённые по генеральному плану окружности, площади которых соответствуют расчётным нагрузкам цехов. Картограмма позволяет проектировщику наглядно представить распределение нагрузок на территории предприятия и определить оптимальное расположение главной понизительной подстанции.

Радиус окружностей определяется как:

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

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» [3].

«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» [14].

Расчет координат ЦЭН приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Расчет координат ЦЭН

Цеха	X <sub>i</sub> , м	Y <sub>i</sub> , м	S <sub>p</sub> , кВА	S <sub>p</sub> ·X <sub>i</sub> , кВА	S <sub>p</sub> ·Y <sub>i</sub> , кВА
Литейный цех	55	287,5	703,61	38698,3	202286,5
Заготовительно-сварочный цех	167,5	310	2943,09	492966,9	912356,7
Обмоточный цех	167,5	310	340,76	57076,6	105634,4
Изоляционный цех	270	287,5	702,74	189740,4	202038,4
Лаковарочный цех	420	300	152,27	63952,4	45680,3
Сборочный цех	55	210	242,49	13337,2	50923,8
Аппаратный цех	55	167,5	514,27	28285,0	86140,6
Кислородная станция	55	130	138,35	7609,3	17985,5
Компрессорная 0,38 кВ	197,5	220	121,48	23992,5	26725,8
Компрессорная 10 кВ	197,5	220	770,00	152075,0	169400,0
Насосная	302,5	182,5	819,73	247967,2	149600,1
Испытательный цех	400	195	85,15	34058,2	16603,4
Кузнечный цех	97,5	65	699,55	68205,7	45470,4



Продолжение таблицы 5

Цеха	X <sub>i</sub> , м	Y <sub>i</sub> , м	Sp, кВА	Sp·X <sub>i</sub> , кВА	Sp·Y <sub>i</sub> , кВА
Заводоуправление	272,5	65	34,57	9421,5	2247,3
Итого			8074,9	1427386,3	2033093,4
Координаты ЦЭН	X, м	Y, м	-	-	-
	176,8	251,8	-	-	-

Например, для ПУ №1, по (6,7):

$$R = \sqrt{\frac{703,61}{0,5 \cdot 3,14}} = 21,17 \text{ м,}$$

$$\alpha = 360 \cdot 5,07 / 703,61 = 2,6^\circ.$$

Расчеты сведены в таблице 6.

Таблица 6 – Расчет картограммы нагрузок

Цеха	R, м	α	Soc, кВА
Литейный цех	21,17	2,6	5,07
Заготовительно-сварочный цех	43,30	0,8	6,85
Обмоточный цех	14,73	7,2	6,85
Изоляционный цех	21,16	3,5	6,85
Лаковарочный цех	9,85	14,4	6,08
Сборочный цех	12,43	23,3	15,69
Аппаратный цех	18,10	3,1	4,44
Кислородная станция	9,39	8,4	3,24
Компрессорная: а) 0,38 кВ	8,80	13,3	4,48
б) Синхр. двигатели 10 кВ	22,15	0,0	0,00
Насосная	22,85	3,1	6,97
Испытательный цех	7,36	26,0	6,14
Кузнечный цех	21,11	1,8	3,42
Заводоуправление	4,69	53,9	5,18

Картограмма нагрузок – на рисунке 2.

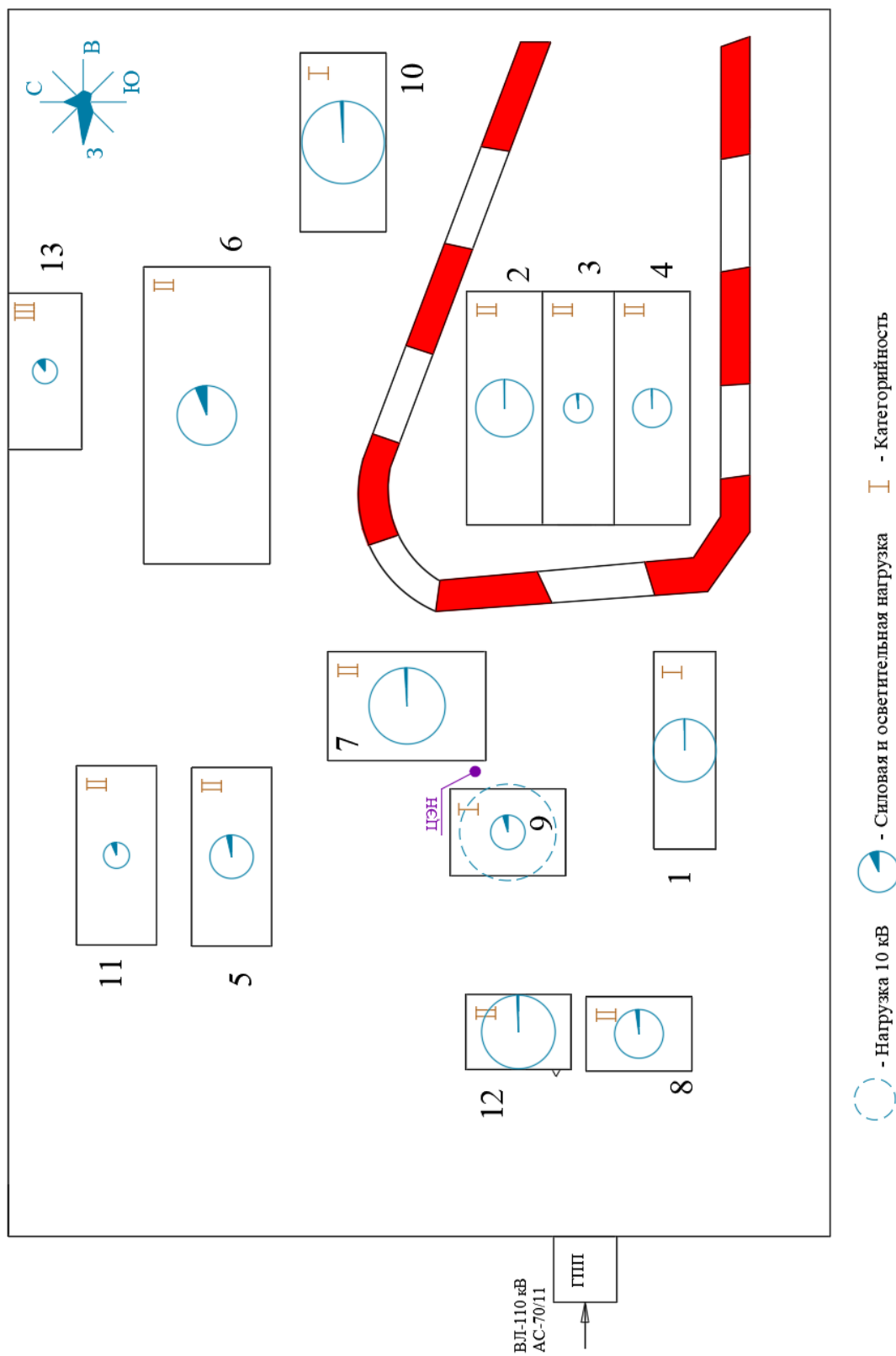


Рисунок 2 – Картограмма нагрузок

ГПП будет установлена за территорией, с учетом розы ветров и направления подхода питающей ЛЭП.

### **2.3 Выбор силовых трансформаторов цеховых подстанций**

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. «Обычно устанавливают двухтрансформаторные подстанции, так как они обеспечивают бесперебойное электроснабжение потребителей цеха любых категорий. Однако при небольшом количестве потребителей II и III категории, однотрансформаторные подстанции могут быть более экономичными. Двухтрансформаторные подстанции применяют при значительном числе потребителей II категории или наличии потребителей I категории, неравномерном суточном и годовом графике нагрузки предприятия, сезонном режиме работы и значительной разницей нагрузки в сменах» [14]. 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 [10,17].

«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 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;

$\beta$  – 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» [20]:

$$Q_{нн} = Q_p - Q_{БК} \quad (12)$$

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

$$S_o = \frac{703,61}{0,7 \cdot 2} = 503 \text{ кВА}$$

Устанавливается два энергоэффективных трансформатора ТМГ12-630/10.

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 таблице 7.

Таблица 7 – Выбор трансформаторов ТП

Подстанции	Зона охвата, № цехов	So, кВА	St, кВА (ТМГ12)
ТП-1	1	503	630
ТП-2	2	2102	2500
ТП-3	3	243	250
ТП-4	4	502	630
ТП-6	6,13, освещ. терр.	210	250
ТП-7	5,7,11	535	630
ТП-9	9	87	100
ТП-10	10	586	630
ТП-12	12,8	598	630

Расчет КРМ на ТП-1, по (10,11):

$$Q_1 = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 630)^2 - 507,8^2} = 721 \text{ квар},$$

$$Q_{0,4} = 487,03 - 721 = -234 \text{ квар}.$$

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

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

$$K_n = \frac{703,61}{630} = 1,12 \leq 1,4.$$

Расчет КРМ на ТП и проверка трансформаторов по перегрузке приведены в таблице 8» [10].

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

Подстанции	Q <sub>0,4</sub> , квар	K <sub>п</sub>
ТП-1	-234	1,12
ТП-2	-695	1,18
ТП-3	-14	1,36
ТП-4	-266	1,12
ТП-6	-76	1,18
ТП-7	-188	1,19
ТП-9	-28	1,21
ТП-10	-90	1,30
ТП-12	-60	1,33

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

«Комплектные трансформаторные подстанции (КТП) являются важным элементом инфраструктуры многих объектов, обеспечивая приём, преобразование и распределение электроэнергии» [14]. Они 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 [16].

#### **2.4 Компенсация реактивной мощности, выбор и проверка силовых трансформаторов ГПП**

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 [5]. В данном случае КРМ будет производиться централизованно на шинах 10 кВ ГПП. Автоматическая КРМ – это система, предназначенная для поддержания заданного уровня коэффициента

мощности в электрических сетях. Она обеспечивает компенсацию реактивной и гармонической составляющих тока потребителей, снижая потребление реактивной мощности и повышая коэффициент мощности. Преимущества автоматической КРМ включают снижение расхода электроэнергии, потерь мощности, пусковых токов трансформаторов и улучшение качества электроэнергии.

«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  $\Delta P_{\kappa}$  – потери КЗ, кВт;

$n$  – число трансформаторов, шт;

$S_n$  – номинальная мощность, кВА;

$\Delta P_{xx}$  – 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  $U_{\kappa}$  – напряжение КЗ, %;

$I_{xx}$  – ток ХХ, %» [20].

Для ТП-1, по (14,15):

$$\Delta P_m = \frac{6,75}{2} \cdot \frac{507,8^2 + 487,03^2}{630^2} + 2 \cdot 0,8 = 5,81 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_m = \frac{5,5}{2 \cdot 100} \cdot \frac{507,8^2 + 487,03^2}{630^2} + \frac{2 \cdot 0,7}{100} \cdot 630 = 30,43 \text{ квар}.$$

Нагрузка ТП с учетом потерь рассчитана в таблице 9.



Таблица 9 – Нагрузка ТП с учетом потерь

Подстанции	$\Delta P$ , кВт	$\Delta Q$ , квар	$P_p + \Delta P$ , кВт	$Q_p + \Delta Q$ , квар
ТП-1	5,81	30,43	513,61	517,46
ТП-2	20,19	120,28	1935,33	2355,01
ТП-3	3,87	14,95	257,51	242,51
ТП-4	5,80	30,38	582,94	431,33
ТП-6	3,10	12,29	220,34	210,79
ТП-7	6,37	33,29	576,87	518,27
ТП-9	1,71	6,12	99,57	78,10
ТП-10	7,31	38,15	623,54	578,72
ТП-12	7,57	39,45	589,07	642,42
Итого	61,73	325,35	6168,76	5608,18

«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» [15].

$$Q_{10} = 5282,84 + 325,35 = 5608,18 \text{ квар,}$$

$$P_{сумм} = 6107,03 + 61,73 = 6168,76 \text{ кВт.}$$

«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;

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

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

где  $\alpha$  – 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  $\alpha_m$  – допустимая перегрузка СД;

$P_n$  – номинальная активная мощность СД, кВт;

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

$\eta_n$  – КПД двигателя, о.е.» [12].

$$\Delta Q_m = \frac{10,5}{2 \cdot 100} \cdot \frac{6168,76^2 + 5608,18^2}{6300^2} + \frac{2 \cdot 0,7}{100} \cdot 6300 = 801,3 \text{ квар},$$

$$Q_c = \frac{0,92 \cdot 1100 \cdot 0,75}{0,95} = 798,95 \text{ квар},$$

$$Q_{\text{кв}} / 2 = \frac{5608,18 + 801,3 - 0,33 \cdot 6107,03 - 798,95}{2} = 3595 \text{ квар}.$$

Устанавливаются две конденсаторные батареи УККРМ-10,5-1800 по 1800 квар. Применение автоматической КРМ позволяет снизить расходы на электроэнергию, уменьшить нагрузки на трансформаторы, увеличить их срок службы. Кроме того, снижается нагрузка на коммутирующую аппаратуру и увеличивается качество электрической энергии.

Устанавливаются трансформаторы ТМН-6300/110, внешний вид приведен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Трансформатор ТМН-6300/110

Нагрузки после КРМ:

$$Q_{pk} = 5608,18 - 2 \cdot 1800 = 2008,18 \text{ квар,}$$

$$P_{pk} = P_{сумм} = 6168,76 \text{ кВт.}$$

«Полная нагрузка ГПП:

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

где  $k_{рма}$  и  $k_{рмр}$  – коэффициенты разновременности нагрузок» [20].

$$S_p = \sqrt{(0,95 \cdot 6168,76)^2 + (0,95 \cdot 2008,18)^2} = 6163,04 \text{ кВА}$$

Послеаварийная перегрузка, по (13):

$$K_n = \frac{6163,04}{6300} = 0,978 < 1,4$$

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

$$\Delta P_m = \frac{44}{2} \cdot \frac{5860,33^2 + 1907,78^2}{6300^2} + 2 \cdot 11,5 = 65,15 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_m = \frac{10,5}{2 \cdot 100} \cdot \frac{5860,33^2 + 1907,78^2}{6300^2} + \frac{2 \cdot 0,7}{100} \cdot 6300 = 734,44 \text{ квар}.$$

Итого нагрузка ГПП по ВН:

$$S_p = \sqrt{(5860,33 + 65,15)^2 + (1907,78 + 734,44)^2} = 6487,88 \text{ кВА}$$

Далее выбирается схема внутризаводского электроснабжения.

## 2.5 Выбор схемы внутризаводского электроснабжения

Выбор схемы внутреннего электроснабжения – важный этап проектирования системы электроснабжения промышленного предприятия. Он зависит от категорий надёжности потребителей электроэнергии, их территориального размещения и особенностей режимов работы. Основные схемы внутризаводского электроснабжения – магистральная, радиальная и смешанная. Магистральная схема применяется при большом количестве потребителей и нецелесообразности использования радиальных схем. Она сокращает звенья коммутации, но имеет меньшую надёжность по сравнению с радиальными схемами. «Радиальные схемы обеспечивают глубокое секционирование системы электроснабжения начиная от источников питания и заканчивая сборными шинами до 1 кВ цеховых подстанций. Они предпочтительны для сосредоточенных потребителей, таких как насосные станции, печи, преобразовательные установки и цеховые подстанции» [12]. Смешанная схема представляет собой комбинацию магистральной и радиальной схем, адаптированную к конкретным условиям предприятия.

«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 прокладки КЛ – на рисунке 4.

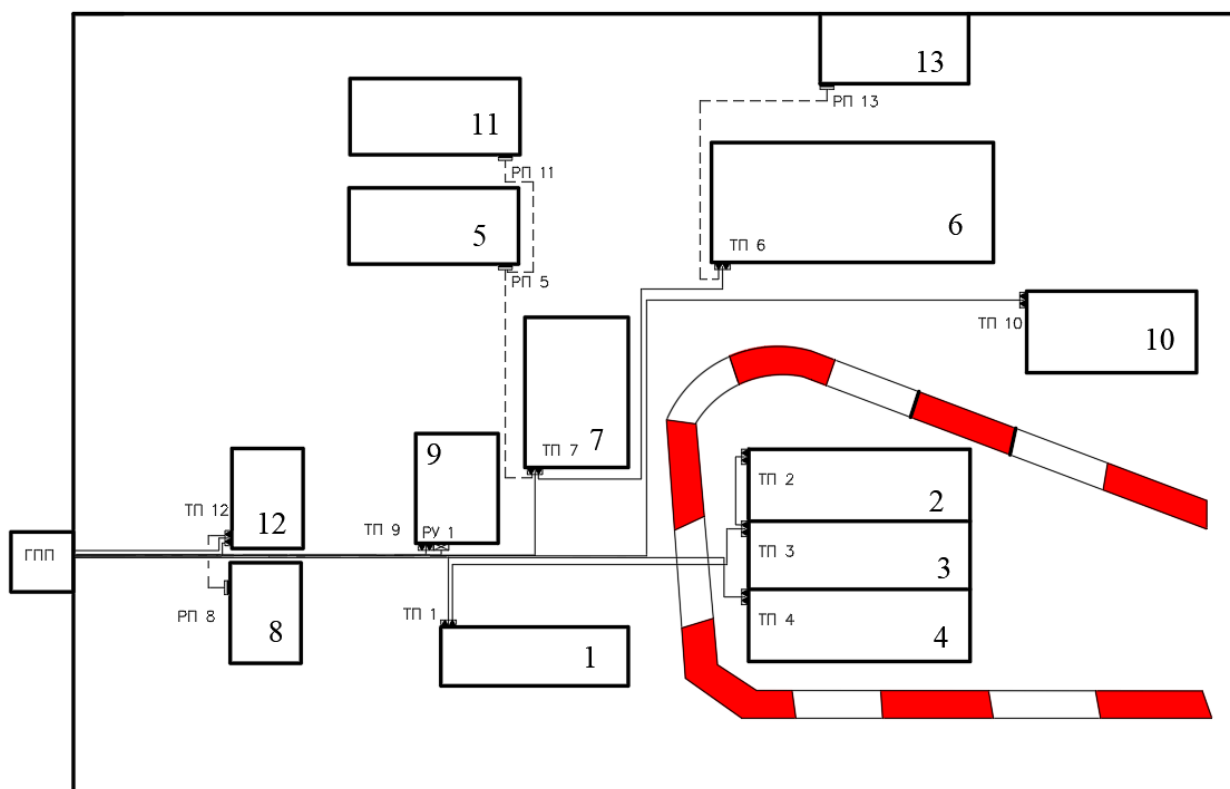


Рисунок 4 – План прокладки КЛ

Далее выбираются кабели и аппараты защиты линий.

## 2.6 Выбор кабелей и аппаратов защиты линий

Правильный выбор кабелей и аппаратов защиты линий является ключевым фактором для обеспечения безопасности и надёжной работы СЭС предприятия.

Расчет для КЛ до ТП-1.

«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/мм<sup>2</sup>» [12].

$$I_p = \frac{4131,01}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 2} = 119,3 \text{ А},$$

$$I_{\text{ав}} = \frac{4131,01}{\sqrt{3} \cdot 10} = 238,5 \text{ А},$$

$$F_{\text{эк}} = \frac{119,3}{1,4} = 85 \text{ мм}^2.$$

С поправкой на аварийный ток выбирается кабель АПвП 3·185 мм<sup>2</sup>,  $I_{\text{дон}} = 264 \text{ А}$  [18].

Кабель АПвП состоит из алюминиевой токопроводящей жилы, изоляции из сшитого полиэтилена, оболочки из полиэтилена и комбинированного экрана из электропроводящей бумаги, медных проволок и медной ленты. Благодаря своим характеристикам, он обладает высокой надёжностью, долговечностью и устойчивостью к коррозии.

Выбор кабелей 10 кВ сведен в таблице 10.

Таблица 10 – Выбор кабелей 10 кВ

Участок	$I_p, A$	$I_{ав}, A$	сечение жил, $mm^2$	$I_{доп}, A$
ГПП--ТП-1	119,3	238,5	185	264
ТП-1--ТП-3	98,2	196,4	120	204
ТП-3--ТП-2	88,0	176,0	120	204
ГПП--ТП-4	20,9	41,9	16	64
ГПП--ТП-9	3,7	7,3		
ГПП--ТП-10	24,6	49,1		
ГПП--ТП-12	56,4	112,7	50	119
ТП-12--ТП-7	31,2	62,4	25	77
ТП-7--ТП-6	8,8	17,6	16	64
ГПП--РУ-1	27,8	55,6		

«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 %»

[3].

Для КЛ до ТП-1:

$$\Delta U_{л} = \frac{\sqrt{3} \cdot 238,5 \cdot 0,278 \cdot 100}{10000} (0,167 \cdot 0,841 + 0,08 \cdot 0,54) = 0,09 \% < 5 \%$$

Проверка КЛ 10 кВ сведена в таблице 11.

Таблица 11 – Проверка КЛ 10 кВ

Участок	Fст,мм <sup>2</sup>	го, Ом/км	хо, Ом/км	L,км	ΔU,%
ГПП--ТП-1	185	0,167	0,08	0,278	0,09
ТП-1--ТП-3	120	0,26	0,08	0,267	0,47
ТП-3--ТП-2				0,070	0,11
ГПП--ТП-4	16	1,95	0,11	0,189	0,54
ГПП--ТП-9				0,495	0,24
ГПП--ТП-10				0,820	2,72
ГПП--ТП-12	50	0,63	0,09	0,124	0,30
ТП-12--ТП-7	25	1,24	0,1	0,247	0,66
ТП-7--ТП-6	16	1,95	0,11	0,263	0,31
ГПП--РУ-1				0,255	0,96

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

Выбор кабеля 0,4 кВ до РП5.

Расчётный ток, по (22):

$$I_p = \frac{199,17}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 302,6 \text{ А}$$

Принимаем кабель АВБШв 4x150 мм<sup>2</sup>,  $I_{дон} = 335 \text{ А}$  [18].

Потери напряжения в КЛ, по (24):

$$\Delta U_{л} = \frac{\sqrt{3} \cdot 302,6 \cdot 0,17 \cdot 100}{380} (0,206 \cdot 0,878 + 0) = 0,47 \% < 5 \%$$

«Потери напряжения не превышают допустимые 5%» [3].



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

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

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

КЛ	$I_{ав}, A$	Сечение АВБШв, $мм^2$	$I_{доп}, A$	$\Delta U, \%$	Марка авт. выключателя
ТП7--РП5	302,6	4x150	312	0,47	ВА-52-39 (320 А)
РП5--РП11	107,3	4x25	116	0,48	ВА-51-35 (125 А)
РП6--РП13	45,4	4x6	55	1,81	ВА-51-35 (50 А)
ТП12--РП8	138,2	4x50	167	0,66	ВА-51-35 (160 А)

Далее для выбора электрооборудования ГПП определяются токи КЗ.

## 2.7 Определение токов короткого замыкания

«Расчёт токов короткого замыкания – это сложный процесс, который учитывает режимы работы и характеристики элементов систем электроснабжения. В процессе расчёта принимаются некоторые допущения, которые не дают значительных погрешностей:

- намагничивание трансформаторов не учитывается;
- трёхфазная сеть принимается симметричной;
- насыщение магнитных систем не учитывается;
- емкости не учитываются.

Расчёт токов короткого замыкания проводится с целью подбора аппаратуры, проверки электрической установки на термическую и электродинамическую устойчивость.

Исходными для расчета являются принятый вариант схемы электроснабжения, выбранные к установке кабели. Составляется эквивалентная схема замещения, куда вносятся только элементы сети, значимо влияющие на величину токов короткого замыкания, наносятся точки КЗ. Схема замещения показана на рисунке 5.

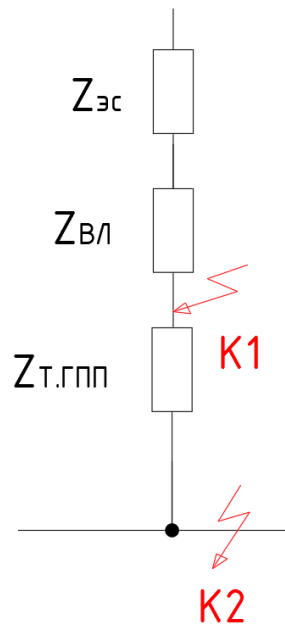


Рисунок 5 – Схема замещения

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  $\Delta P_{\kappa}$  – 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  $\Delta U_{\kappa}$  – потери напряжения КЗ, %» [14].

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

«Токи трехфазного и двухфазного КЗ:

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

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

Ударный ток КЗ:

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

где  $\kappa_y$  – ударный коэффициент.

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

где  $T_a$  – постоянная апериодической слагающей, с» [14].

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

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

Сопротивление энергосистемы:

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

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

$$X_C = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 9,811} = 6768 \text{ мОм}$$

Сопротивления трансформаторов ГПП, по (26-28):

$$R_m = \frac{44000 \cdot 115^2}{6300^2} \cdot (10,5 / 115)^2 = 122 \text{ мОм},$$

$$Z_m = \frac{10,5 \cdot 115^2}{100 \cdot 6,3^2} \cdot (10,5 / 115)^2 = 1838 \text{ мОм},$$

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

Сопротивления ВЛ 110 кВ:

$$R_{\text{вл}} = 0,429 \cdot 19,6 \cdot \left(\frac{10,5}{115}\right)^2 = 35 \text{ мОм},$$

$$X_{\text{вл}} = 0,444 \cdot 19,6 \cdot \left(\frac{10,5}{115}\right)^2 = 36 \text{ мОм}.$$

Эквивалентные сопротивления цепи:

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

$$\Sigma r = 35 + 122 = 157 \text{ мОм},$$

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

$$\Sigma x = 6768 + 36 + 1833 = 8637 \text{ мОм},$$

$$z = \sqrt{157^2 + 8637^2} = 8638 \text{ мОм}.$$

По формулам (29–33):

$$I_{кз}^{(3)} = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 8638} = 7,686 \text{ кА},$$

$$T_a = 8638 / (314 \cdot 157) = 0,1751,$$

$$k_y = 1 + e^{\frac{0,01}{0,1751}} = 1,945,$$

$$I_y = 7,686 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1,945 - 1)^2} = 12,825 \text{ кА},$$

$$I_{кз}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 7,686 = 6,656 \text{ кА}.$$

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

Таблица 13 – Результаты расчетов токов КЗ

место КЗ	$I_{к}^{(3)}$ , кА	$I_y$ , кА	$I_{к}^{(2)}$ , кА
Точка К1	9,759	16,722	8,451
Точка К2	7,686	12,825	6,656

С учетом токов КЗ выбирается электрооборудование для ГПП,

## 2.8 Выбор и проверка электрооборудования ГПП

Высоковольтные выключатели – это электрические аппараты, работающие при напряжениях свыше 1 кВ. Они предназначены для включения и выключения электроустановок и устройств высокого напряжения в нормальных режимах, а также для автоматического отключения электрических цепей при перегрузках и коротких замыканиях.

Основными элементами выключателей являются контактные системы, дугогасительные устройства, приводы и изоляционные конструкции. Они характеризуются такими параметрами, как номинальное напряжение, номинальный ток и ток отключения. Высоковольтные выключатели классифицируются по методу гашения электрической дуги, виду изоляции и конструктивному исполнению. Воздушные выключатели используют поток сжатого воздуха для замыкания и размыкания контактов и гашения электрической дуги. Они применяются в электроустановках напряжением 110 кВ и выше.

«Условия выбора выключателей:

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

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

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

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

$I_{к}$  – ток трехфазного КЗ, кА.

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

где  $i_{пр.с}$  – сквозной ток КЗ, кА;

$i_{у}$  – 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,  $\text{кА}^2 \cdot \text{с}$ .

Условия выбора разъединителей» [13]:

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

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

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

$$i_{дин} \geq i_y. \quad (45)$$

Выбор коммутационных аппаратов сведен в таблице 14.

Таблица 14 – Выбор коммутационных аппаратов

Параметры	ОРУ			ЗРУ	
	По расчету	По паспорту, ВВБ-110/2000	По паспорту, РНДЗ-110/1000	По расчету	По паспорту, ВВ/ТЕЛ-10/630
U <sub>ном</sub> , кВ	110	110	110	10	10
I <sub>ном</sub> , А	32,6	2000	2000	355,8	630
I <sub>н.откл.</sub> , кА	9,759	31,5	20	7,686	20
B <sub>к</sub> , кА <sup>2</sup> ·с	11,9	3600	1200	7,8	1200
i <sub>дин</sub> , кА	16,722	40	40	12,825	20

### Выбор ОПН.

Ограничители перенапряжений (ОПН) – это высоковольтные устройства, предназначенные для защиты от резких скачков напряжения, вызванных различными ситуациями, такими как перехлестывание линий или гроза. Конструкция ОПН включает варистор, выполняющий функцию нелинейного переменного резистора, и защитный корпус из фарфора или полимеров. При возникновении импульсного скачка напряжения или короткого замыкания варистор снижает своё сопротивление, пропуская через себя короткий токовый импульс, который затем рассеивается в виде тепла.

Для защиты трансформатора со стороны 110 кВ устанавливаем ОПН-110/88/10/450-У1. Со стороны 10 кВ устанавливаем ОПН-10/11,5-10/400-У1.

Выбор трансформаторов тока и напряжения.

Измерительные трансформаторы играют важную роль в электротехнике и обеспечивают точность и безопасность измерений в различных электрических системах.

«Согласно напряжениям в местах установки и полученным расчетным токам выбираем следующие трансформаторы тока (ТТ)» [13]: на фидерах 10 кВ: ТПЛК10-20..200/5; на вводах ЗРУ 10 кВ: ТПЛК10-400/5; на ОРУ 110 кВ: ТФНД-110 – 50/5.

Проверка ТТ в режиме КЗ:

– в ЗРУ 10 кВ:

По динамической стойкости:  $i_{дин} = 74,5 \text{ кА} \geq i_{уд} = 12,8 \text{ кА}$ .

По термической стойкости:  $I_m^2 \cdot t_m = 2900 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \geq B_k = 7,8 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ .

– на ОРУ 110 кВ:

$$i_{дин} = 42 \text{ кА} \geq i_{уд} = 16,7 \text{ кА},$$
$$I_m^2 \cdot t_m = 3600 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \geq B_k = 11,9 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

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

$$U_{ном} \geq U_{уст},$$
$$S_{ном} \geq S_{2\Sigma}.$$

Принимаем ТН типа НАМИ-10-95.

$$U_{н.ант.} = 10 \text{ кВ} \geq U_{н.уст.} = 10 \text{ кВ},$$
$$S_{ном} = 200 \text{ ВА} \geq S_{2\Sigma} = 43 \text{ ВА}.$$

ТТ и ТН проходят проверку.

Выбор ячеек КРУ.



Комплектные распределительные устройства (КРУ) представляют собой распределительные устройства, собранные из унифицированных блоков высокой степени готовности, собранных в заводских условиях. Они содержат коммутационные аппараты, сборные и соединительные шины, вспомогательные устройства РЗА и средства учёта и измерения.

Выбираются КРУ К-132/630 А, внешний вид – на рисунке 6.



Рисунок 6 – Ячейки КРУ

Преимущества КРУ включают уменьшение занимаемых площадей, легкое расширение, многофункциональность, взрыво- и пожаробезопасность, надежность и стойкость к внешним воздействиям [9].

## **2.9 Выбор оборудования релейной защиты и автоматики**

Защита силовых трансформаторов ГПП и фидеров 10 кВ будет обеспечиваться микропроцессорной релейной защитой (МурЗ), это современное оборудование, использующее компьютерные технологии на базе процессоров вместо традиционных электромеханических и статических

реле [7,11]. «РЗ трансформаторов ГПП будет обеспечиваться терминалами Сириус-Т, схема РЗ приведена на рисунке 7.

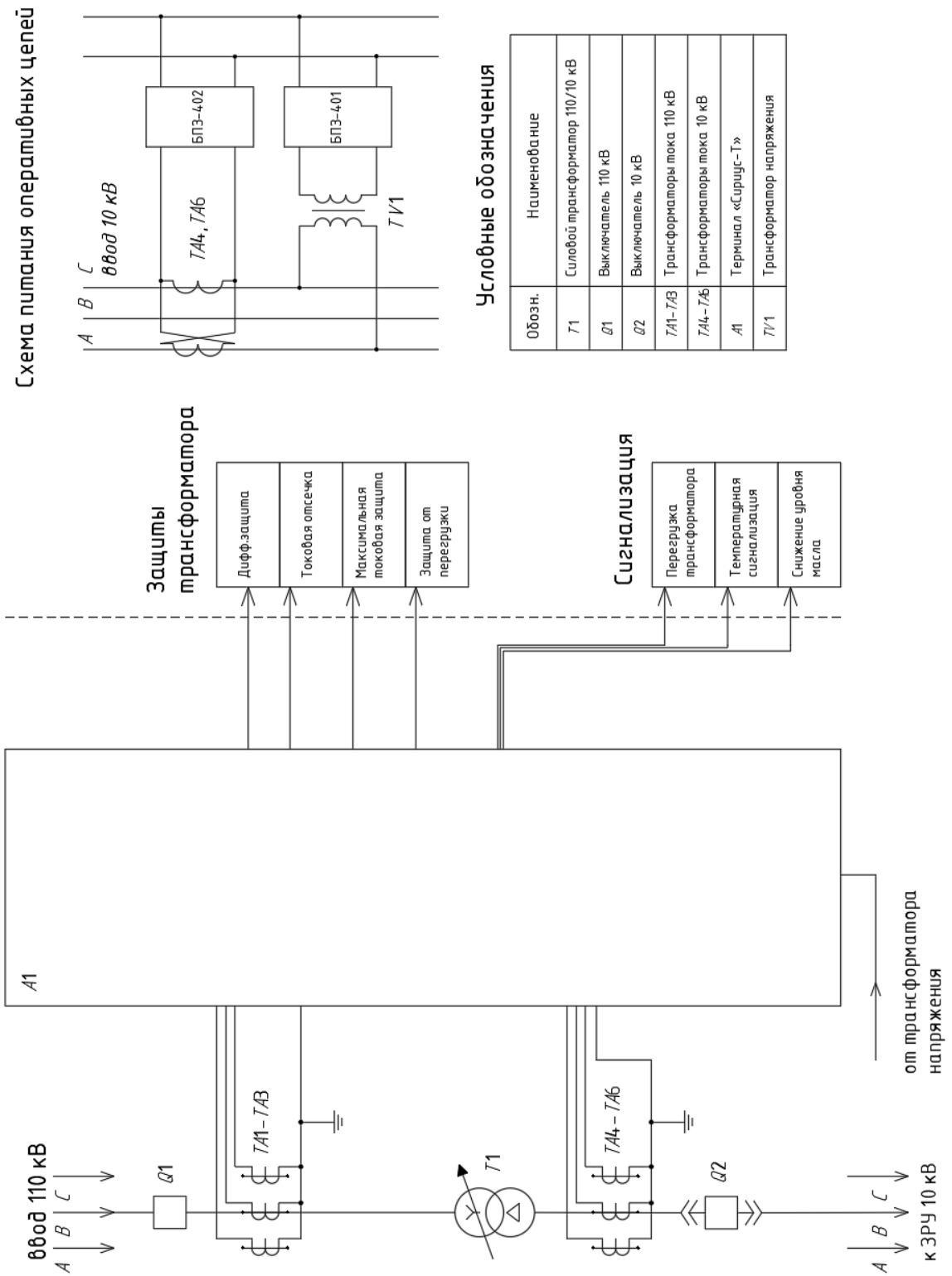


Рисунок 7 – Схема РЗ трансформаторов ГПП

РЗ фидеров 10 кВ будет обеспечиваться терминалами Сириус-2Л-02, схема РЗ приведена на рисунке 8.

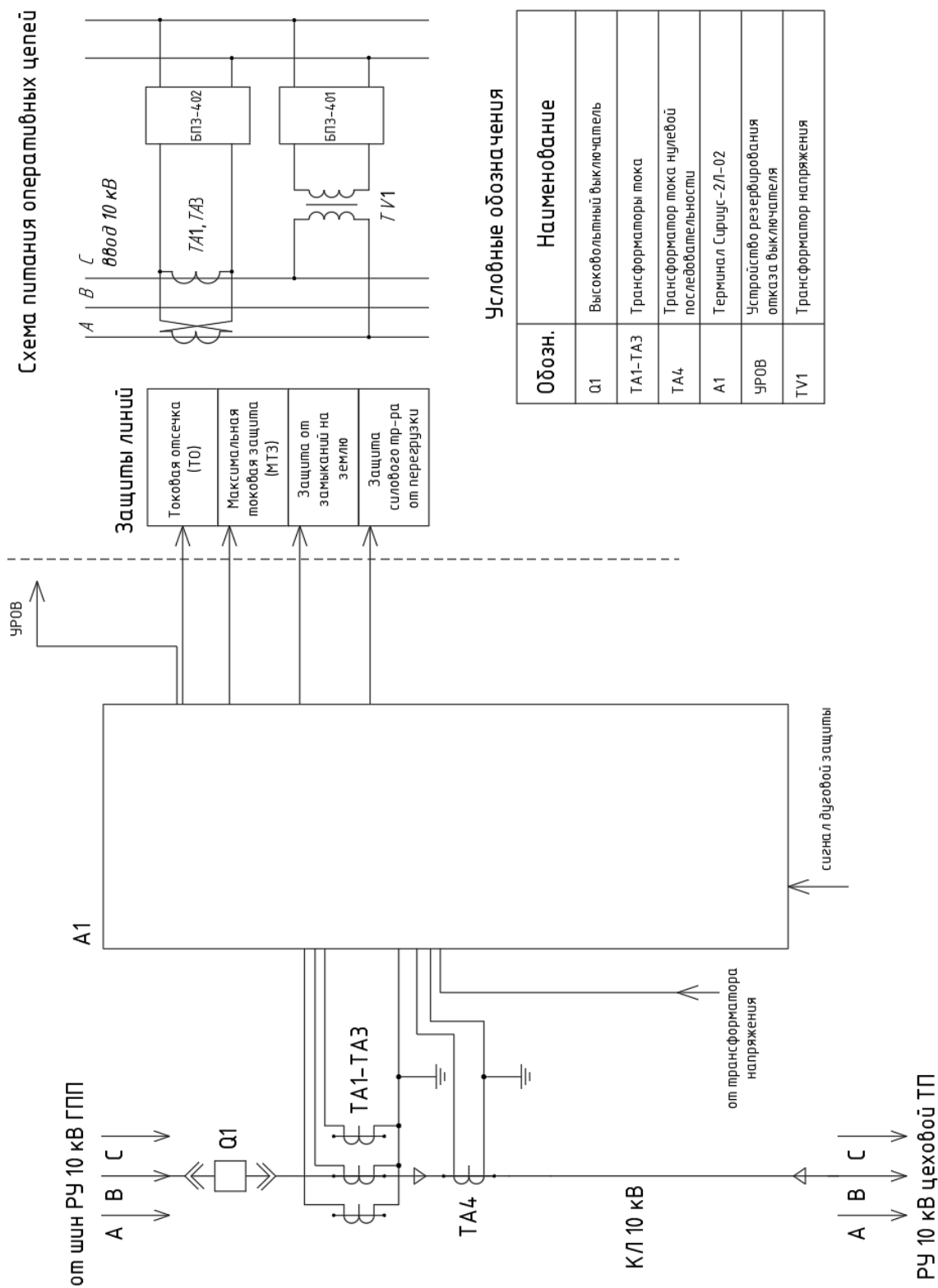


Рисунок 8 – Схема РЗ линий 10 кВ

Внешний вид терминалов РЗ показан на рисунке 9.



Рисунок 9 – Внешний вид терминалов РЗ

Уставки защит задаются программно» [2].

Проводится расчет уставок защит.

РЗ силовых трансформаторов.

«Проверка ТТ производится по номинальному току, току намагничивания и по отстройке от переходных режимов.

Условие пригодности ТТ:

$$0,1 \cdot I_{НОМ.Т} < I_{НОМ.ТТ} < 2,5 \cdot I_{НОМ.Т}, \quad (46)$$

где  $I_{НОМ.Т}$  – номинальный ток ВН, А;

$I_{НОМ.ТТ}$  – первичный ток ТТ, А» [2].

Для выбранных ТТ:

$$0,1 \cdot 33,07 < 50 < 2,5 \cdot 33,07 = 82,7 \text{ А,}$$

$$0,1 \cdot 363,74 < 400 < 2,5 \cdot 363,74 = 909,4 \text{ А.}$$

«Условие по току намагничивания.

Сопротивление силового трансформатора при насыщении магнитопровода:

$$X_{*B}^{(1)} = 0,094 + \frac{0,74 \cdot U_K}{100}, \quad (47)$$

$$X_{*B}^{(1)} = 0,094 + \frac{0,74 \cdot 10,5}{100} = 0,172 \text{ о.е.}$$

Базисное сопротивление:

$$X_{\sigma} = \frac{U_{BH}^2}{S_{н.т.}}, \quad (48)$$

$$X_{\sigma} = \frac{121^2}{6,3} = 2324 \text{ Ом}$$

Сопротивление питающей ВЛ:

$$X_L = x_0 \cdot L, \quad (49)$$

где  $x_0$  – удельное сопротивление линии, Ом/км» [7].

$$X_L = 0,444 \cdot 19,6 = 8,702 \text{ Ом}$$

«Сопротивление ВЛ приводится к базисным условиям:

$$X_{*L} = 8,702 / 2324 = 0,0037 \text{ о.е.}$$

Сопротивление контура включения:

$$X_* = X_{л} + K_1 \cdot X_{*B}^{(1)}, \quad (50)$$

где  $K_1 = 1,1..1,15$  – коэффициент насыщения стали.

$$X_* = 0,0037 + 1,1 \cdot 0,172 = 0,1926 \text{ о.е.},$$

$$X = 0,1926 \cdot 2324 = 447,63 \text{ Ом.}$$

Амплитуда тока намагничивания:

$$I_{ампл} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{лин} \cdot (1 + A)}{\sqrt{3} \cdot X}, \quad (51)$$

где  $A$  – смещение синусоиды потокосцепления.

$$I_{ампл} = \frac{\sqrt{2} \cdot 121 \cdot (1 + 0,39)}{\sqrt{3} \cdot 447,63} = 306,75 \text{ А}$$

Кратность тока намагничивания:

$$K_{ТТ} = \frac{I_{ампл}}{\sqrt{2} \cdot I_{ВН.ТТ}}, \quad (52)$$

$$K_{ТТ} = \frac{306,75}{\sqrt{2} \cdot 50} = 4,34 < 6,7.$$

Сопротивление нагрузки ТТ:

$$R_{нагр} = R_k + R_{пер} + R_{вх.терм}, \quad (53)$$

где  $R_k$  – сопротивление кабеля, Ом;

$R_{пер}$  – сопротивление контактов, Ом;

$R_{ex.терм}$  – сопротивление терминала, Ом.

$$R_{\kappa} = \rho \cdot L / S_{\kappa}, \quad (54)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление жил, Ом мм<sup>2</sup>/м;

$S_{\kappa}$  – сечение жил, мм<sup>2</sup>» [7].

$$R_{\kappa} = 0,029 \cdot 50 / 2,5 = 0,58 \text{ Ом},$$

$$R_{нагр} = 0,58 + 0,05 + 0,01 = 0,64 \text{ Ом}.$$

$$R_{нагр} = 0,64 \text{ Ом} : K_{10} = 24 \geq 20.$$

«Условие по отстройке от переходных режимов. Приведенная предельная кратность для ТТ:

$$K' = K_{10} \cdot I_{НОМ.ТТ} / I_{НОМ.Т} > 20, \quad (55)$$

$$K_{10} = K' \cdot I_{НОМ.Т} / I_{НОМ.ТТ} < 24, \quad (56)$$

$$K_{10} = 20 \cdot 33,07 / 50 = 13,23 < 24.$$

Условие выполняется.

Ток отсечки:

$$I_{d \max} \geq K_{отс} \cdot K_{ТТ}, \quad (57)$$

где  $K_{отс}$  – коэффициент отстройки.

$$I_{d \max} \geq 1,4 \cdot 4,34 = 6,074 \text{ А},$$

$$I_{d \max} \geq K_{отс} \cdot K_{НБ} \cdot I_{кз.макс}, \quad (58)$$

где  $K_{НБ}$  – коэффициент небаланса.

$$I_{d \max} \geq 1,2 \cdot 0,7 \cdot 7,69 = 6,457 \text{ кА}$$

Выбор типа торможения.

Самоадаптирующееся торможение обеспечивается, если амплитуда броска тока намагничивания не превышает 8-кратного первичного тока ВН трансформатора:

$$I_{амт} / I_{ном} \leq 8, \quad (59)$$

где  $I_{амт}$  – амплитуда броска тока намагничивания, А;

$I_{ном}$  – первичный ток ВН, А.

$$306,75 / 33,07 = 9,28 > 8$$

Используется традиционное торможение» [7].

«Определение минимального тока срабатывания:

$$I_{сз} > 1,1 \left( K_{пер} \cdot \varepsilon + \frac{\Delta U_{рег}}{1 - \Delta U_{рег}} + 0,02 \right), \quad (60)$$

где  $\varepsilon$  – погрешность ТТ;

$K_{пер}$  – коэффициент переходного режима;

$\Delta U_{рег}$  – диапазон РПН.

$$I_{сз} > 1,1 \left( 1,0 \cdot 0,1 + \frac{0,16}{1 - 0,16} + 0,02 \right) = 0,34$$

Определение крутизны первого наклонного участка тормозной характеристики:



$$\frac{I_d}{I_t} = 1,1 \left( K_{неп} \cdot \varepsilon + \frac{\Delta U_{рег}}{1 - \Delta U_{рег}} + 0,02 \right), \quad (61)$$

$$\frac{I_d}{I_t} = 1,1 \left( 2,0 \cdot 0,1 + \frac{0,16}{1 - 0,16} + 0,02 \right) = 0,45.$$

Точка изменения крутизны тормозной характеристики:

$$SLP \leq 2 + \frac{3}{4} \cdot \frac{I_d}{I_t} \sqrt[3]{\left( \min(I_{БР.НАМ.1*}, I_{БР.НАМ.2*}, I_{БР.НАМ.3*}) \right)^4}, \quad (62)$$

где  $I_{БР.НАМ.i}$  – бросок тока намагничивания, А.

$$I_{БР.НАМ.min} = K_{омс} \cdot I_{НОМ.Т.} \cdot K_{бр}, \quad (63)$$

где  $K_{омс}$  – коэффициент отстройки;

$K_{бр}$  – коэффициент броска тока намагничивания.

$$I_{БР.НАМ.min} = 1,1 \cdot 33,07 \cdot 5 = 181,871 \text{ А},$$

$$SLP \leq 2 + \frac{3}{4} \cdot 0,45 \sqrt[3]{181,871^4} = 18,71.$$

Крутизна второго наклонного участка тормозной характеристики по рекомендации производителя принимается равной 60-70%» [7].

Максимальная токовая защита (МТЗ).

Максимальная токовая защита трансформатора – это один из основных методов защиты электрических сетей от перегрузок и коротких замыканий. Принцип работы МТЗ заключается в сравнении величины тока в контролируемой цепи с заданным значением уставки. Если ток превышает уставку, срабатывает реле и отключает трансформатор от сети. МТЗ обладает рядом преимуществ: простота и надёжность конструкции, быстрое срабатывание при возникновении аварийных ситуаций и возможность

настройки под различные условия эксплуатации. В целом, максимальная токовая защита трансформатора является эффективным и надёжным способом защиты электрических сетей от перегрузок и коротких замыканий. Ее применение позволяет обеспечить безопасность и стабильность работы электрооборудования, а также предотвратить возможные аварии и повреждения.

«Ток срабатывания МТЗ:

$$I_{C3} \geq \frac{K_H \cdot K_{C3}}{K_B} \cdot I_{НОМ.Т} , \quad (64)$$

где  $K_H$ ,  $K_{C3}$ ,  $K_B$  – коэффициенты надежности, самозапуска и возврата.

Кратность тока самозапуска:

$$K_{I.C3} = \frac{I_{НОМ.Т}}{I_{К.МАХ}^3} , \quad (65)$$

В данном случае:

$$K_{I.C3} = \frac{33,07}{7686} = 0,0043$$

По кривой зависимости находим  $K_{C3} = 1,18$ » [11].

$$I_{C3} \geq \frac{1,1 \cdot 1,18}{0,935} \cdot 33,07 = 45,905 \text{ А}$$

«Защита от перегрузок.

Ток срабатывания защиты:

$$I_{C3} = \frac{K_H}{K_B} \cdot I_{НОМ.Т}, \quad (66)$$

где  $K_H$  – коэффициент надежности;

$K_B$  – коэффициент возврата.

$$I_{C3} = \frac{1,1}{0,935} \cdot 33,07 = 38,903 \text{ А}$$

РЗ фидеров 10 кВ.

Токовая отсечка (ТО):

$$I_{C3} \geq K_{отс} \cdot I_{НОМ.Т}, \quad (67)$$

где  $K_{отс}$  – коэффициент отстройки.

МТЗ:

$$I_{C3} \geq \frac{K_H \cdot K_{C3}}{K_B} \cdot I_{р.макс}, \quad (68)$$

где  $I_{р.макс}$  – расчетный ток КЛ, А.

Ток срабатывания реле:

$$I_{CP} = I_{C3} \cdot \frac{k_{cx}}{n_T}, \quad (69)$$

где  $k_{cx}$  – коэффициент схемы подключения ТТ;

$n_T$  – коэффициент трансформации ТТ.

Коэффициент чувствительности» [11]:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к}}^{(2)}}{I_{\text{сз}}}, \quad (70)$$

«Защита от замыканий на землю (ЗНЗ). Ток срабатывания:

$$I_{\text{сз}} \geq k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{б}} \cdot I_{\text{с}}, \quad (71)$$

где  $k_{\text{отс}}$  – коэффициент отстройки;

$k_{\text{б}}$  – коэффициент броска ёмкостного тока;

$I_{\text{с}}$  – ёмкостный ток присоединения, А.

$$I_{\text{с}} = I_{\text{с0}} \cdot L, \quad (72)$$

где  $I_{\text{с0}}$  – ёмкостный ток кабеля, А/км;

$L$  – длина КЛ, км» [11].

Для фидеров к ТП-1, по (67-72):

$$I_{\text{сз}} \geq 5 \cdot 0,119 = 0,596 \text{ кА},$$

$$I_{\text{сз}} \geq \frac{1,1 \cdot 1,18}{0,935} \cdot 238,504 = 331,1 \text{ А},$$

$$I_{\text{ср}} = 331,1 \cdot \frac{1}{200/5} = 8,277 \text{ А},$$

$$k_{\text{ч}} = \frac{6656}{331,1} = 20,1 \geq 1,5,$$

$$I_{\text{с}} = 0,55 \cdot 0,278 = 0,153 \text{ А},$$

$$I_{\text{сз}} \geq 1,2 \cdot 2,5 \cdot 0,153 = 0,459 \text{ А}.$$

Микропроцессорная РЗА обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными устройствами релейной защиты. Обеспечивается более высокая скорость обработки информации и принятия решений, что повышает

надежность защиты оборудования. Терминалы оснащены функциями самодиагностики и мониторинга состояния, что позволяет своевременно выявлять и устранять неисправности, а также контролировать работу системы защиты. Предоставляется доступ к информации о состоянии системы защиты, истории событий и аварий, что облегчает обслуживание и эксплуатацию системы.

## 2.10 Заземление цеховых ТП и ГПП

Система заземления СЭС играет важную роль в нормальной работе ЭО и обеспечении безопасности при работе с электричеством. Она предотвращает поражение электрическим током, защищает людей и оборудование от опасных ситуаций.

Заземление цеховых ТП.

«Удельное сопротивление грунта для электродов:

$$\rho_p = \rho \cdot K_c, \quad (73)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление грунта, Ом · м;

$K_c$  – коэффициент сезонности» [16].

$$\rho_{pв} = 300 \cdot 1,1 = 330 \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

$$\rho_{pг} = 300 \cdot 1,4 = 420 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

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

Сопротивление растеканию для одного ВЭ:

$$R_{овэ} = \frac{\rho_{pв}}{2 \cdot \pi \cdot l} \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot l}{d} \right) + 0,5 \cdot \ln \left( \frac{4 \cdot t + l}{4 \cdot t - l} \right) \right], \quad (74)$$

где  $l$  – длина ВЭ, м;

$d$  – приведенный диаметр, м;

$t$  – расстояние от поверхности до центра ВЭ, м.

$$d = 0,95 \cdot b, \quad (75)$$

где  $b$  – ширина уголка, м» [16].

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

$$t = 3/2 + 0,8 = 2,3 \text{ м},$$

$$R_{\text{овэ}} = \frac{330}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot 3}{0,0475} \right) + 0,5 \cdot \ln \left( \frac{4 \cdot 2,3 + 3}{4 \cdot 2,3 - 3} \right) \right] = 62,224 \text{ Ом}.$$

«Расчетное число ВЭ:

$$n' = R_{\text{овэ}} / R_n, \quad (76)$$

где  $R_n$  – допустимое сопротивление ЗУ, Ом» [16].

$$n' = 62,224 / 4 = 15,6 \approx 16 \text{ шт}$$

«Длина ГЭ:

$$l_2 = 1,05 \cdot a \cdot n', \quad (77)$$

где  $a$  – расстояние между ВЭ, м.

$$a = l_{\text{пер}} / n', \quad (78)$$

где  $l_{\text{пер}}$  – периметр здания ТП, м» [16].

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

$$a = 27,6 / 16 = 1,73 \text{ м,}$$

$$l_2 = 1,05 \cdot 1,73 \cdot 16 = 28,98 \text{ м.}$$

«Сопротивление растеканию ГЭ:

$$R_{23} = \frac{\rho_{pz}}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left( \frac{l^2}{d \cdot t} \right), \quad (79)$$

$$d = 0,5 \cdot b, \quad (80)$$

где  $b$  – ширина полосы, м.

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

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

$$R_{23} = \frac{420}{2 \cdot 3,14 \cdot 28,98} \cdot \ln \left( \frac{28,98^2}{0,025 \cdot 0,825} \right) = 2,861 \text{ Ом.}$$

«Сопротивление ЗУ:

$$R_{zp} = \frac{R_{063} \cdot R_{23}}{R_{063} \cdot \eta_6 \cdot n + R_{23} \cdot \eta_2}, \quad (81)$$

где  $\eta_6, \eta_2$  – коэффициенты использования ВЭ и ГЭ» [16].

$$R_{zp} = \frac{62,224 \cdot 2,861}{62,224 \cdot 0,51 \cdot 16 + 2,861 \cdot 0,3} = 3,804 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом}$$

Расчет заземления ГПП.

«На стороне 110 кВ режим работы нейтрали сети – эффективно заземленная, максимально допустимое сопротивление ЗУ 0,5 Ом» [8].

По формулам (37-44):

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

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

$$R_{\text{огз}} = \frac{330}{2 \cdot 3,14 \cdot 3,5} \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot 3,5}{0,0475} \right) + 0,5 \cdot \ln \left( \frac{4 \cdot 2,55 + 3,5}{4 \cdot 2,55 - 3,5} \right) \right] = 21,611 \text{ Ом,}$$

$$n' = 21,611 / 0,5 \approx 44 \text{ шт,}$$

$$l_{\text{неп}} = 2 \cdot (35 + 45) = 160 \text{ м,}$$

$$a = 160 / 44 = 3,64 \text{ м,}$$

$$l_2 = 1,05 \cdot 3,64 \cdot 44 = 168 \text{ м,}$$

$$R_{\text{эз}} = \frac{420}{2 \cdot 3,14 \cdot 168} \cdot \ln \left( \frac{168^2}{0,025 \cdot 0,825} \right) = 0,245 \text{ Ом,}$$

$$R_{\text{зп}} = \frac{21,611 \cdot 0,245}{21,611 \cdot 0,41 \cdot 44 + 0,245 \cdot 0,21} = 0,415 \text{ Ом} \leq 0,5 \text{ Ом.}$$

Параметры ЗУ соответствуют требованиям ПУЭ, надежная и безопасная эксплуатация СЭС будет обеспечена.

Вывод.

Определены расчетные нагрузки производственных участков и завода в целом. ГПП будет установлена за территорией, с учетом розы ветров и направления подхода питающей ЛЭП. Выбрано электрооборудование СЭС предприятия. Для электроснабжения цехов приняты к установке комплектные трансформаторные подстанции (КТП) с энергоэффективными силовыми трансформаторами. 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. Расчёт токов короткого замыкания проведен с целью выбора электрооборудования ГПП и его проверки на термическую и электродинамическую устойчивость. Выбрано современное электрооборудование ГПП и других элементов СЭС отечественного производства. Рассчитано заземление цеховых ТП и ГПП.



## Заключение

Согласно актуальным требованиям по надежности и энергоэффективности, разработана система электроснабжения завода по производству малогабаритных трансформаторов в г. Санкт-Петербург. Приведена общая характеристика предприятия и его основной вид деятельности. Новый промышленный объект, завод по производству малогабаритных трансформаторов, планируется к постройке ООО «Энерготехсервис». Согласно проектной документации, составлен генеральный план завода, составлен перечень производственных участков и систематизированы данные по их электропотреблению. Рассчитаны среднесменные нагрузки производственных участков и завода в целом, согласно которым построена картограмма нагрузок и определено оптимальное местоположение ГПП. ГПП будет установлена за территорией, с учетом розы ветров и направления подхода питающей ЛЭП. Выбрано электрооборудование СЭС предприятия. Для электроснабжения цехов приняты к установке КТП с энергоэффективными силовыми трансформаторами марки ТМГ12. Выбрано современное электрооборудование ГПП и других элементов СЭС отечественного производства. 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 энергоемких электроприемников. Счетчики подключаются к УСПД СЕ805М через концентраторы. В качестве центра обработки данных АСТУЭ будет использоваться центральный сервер предприятия. Рассчитано заземление цеховых ТП и ГПП.

Предлагаемая СЭС планируется к реализации на рассматриваемом объекте.

## Список используемых источников

1. Андрианов Д.П. Оптимизационные задачи электроснабжения : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2023. 156 с.
2. Бирюлин В.И. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 164 с.
3. Бирюлин В.И. Электроснабжение промышленных и гражданских объектов : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 204 с.
4. Галишников Ю. П. Трансформаторы и электрические машины : курс лекций. М. : Инфра-Инженерия, 2021. 216 с.
5. Голов Р. С. Управление энергосбережением на промышленном предприятии : монография. М. : Дашков и К, 2023. 458 с.
6. Головатый С. Е. Охрана окружающей среды и энергосбережение : учебное пособие. Минск : РИПО, 2021. 304 с.
7. Горемыкин С. А. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем : учебное пособие. М. : ИНФРА-М, 2023. 191 с.
8. Грунтович Н. В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования : учебное пособие. М. : ИНФРА-М, 2023. 271 с.
9. Дубинский Г.Н. Наладка устройств электроснабжения напряжением выше 1000 В : учебное пособие. – 2-е изд., испр. и доп. М. : СОЛОН-Пресс, 2020. 538 с.
10. Иванов С.Н. Надежность электроснабжения : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 164 с.
11. Куксин А. В. Релейная защита электроэнергетических систем : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2021. 200 с.
12. Куксин А.В. Электроснабжение промышленных предприятий : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2021. 156 с.

13. Малафеев А. В. Проектирование электрической части понизительных подстанций промышленного предприятия : учебное пособие. – 3-е изд., перераб. и доп. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 312 с.

14. Ополева Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов: Учебное пособие. М. : Форум, 2022. 416 с.

15. Петухов Р.А. Электроснабжение : учебное пособие. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2022. 328 с.

16. Полуянович Н.К. Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий. СПб. : Лань, 2023. 396 с.

17. Правила устройства электроустановок: действующие разделы 6-го и 7-го изданий. М. : ИНФРА-М, 2023. 832 с.

18. Сибикин М. Ю. Справочник электрика по ремонту электрооборудования промышленных предприятий. – 2-е изд., доп. М. : ИНФРА-М, 2023. 262 с.

19. Шеховцов В. П. Осветительные установки промышленных и гражданских объектов : учебное пособие. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2022. 158 с.

20. Щербаков Е.Ф. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях : учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2023. 495 с.