

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 сельскохозяйственного машиностроения

Студент

С. И. Ивашкин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., О. В. Самолина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Аннотация

Выпускная квалификационная работа выполнена на 66 страницах, включающих в себя 4 рисунка, 42 таблицы. Графическая часть работы состоит из 6 листов формата А1.

В данной работе выполнен расчет электроснабжения завода сельскохозяйственного машиностроения. Рассмотрены такие разделы как выбор главного источника питания и величины используемых напряжений, расчет электрических нагрузок, выбор главной схемы распределительной сети, выбор числа и мощности трансформаторов, расчет и выбор компенсирующих устройств, расчет токов кз, выбор главной схемы электрических соединений, выбор силовых электрических оборудования, проводов и шин воздушных и кабельных линий электропередачи, расчет молниезащиты и заземления главной понизительной подстанции.

В разделе релейной защиты произведен расчет защиты кабельной линии, высоковольтного электродвигателя, защиты силового трансформатора ГПП, АВР на секционном выключателе РУ ГПП.

Всякое промышленное предприятие непрерывно пребывает в состоянии развития: внедряются новые производственные мощности, совершенствуется использование установленного оборудования, укрепляется надежность и т.д.

Система электроснабжения промышленных предприятий (от точки соединения с общей электроэнергетической системой до конечных электроприемников) по структуре обязана быть гибкой, готовой к постоянному развитию технологий, росту мощностей предприятия и улучшению производственных условий.

Содержание

Введение	6
1 Общая характеристика предприятия	8
1.1 Особенности технологического процесса	8
1.2 Характеристика окружающей среды производственных помещений	9
2 Определение силовых расчетных нагрузок ниже 1000 В	100
3 Определение осветительных нагрузок	144
4 Определение расчетных нагрузок ниже 1000 В цехов предприятия	166
5 Определение расчетных нагрузок предприятия выше 1000 В	188
6 Определение расчетной нагрузки предприятия	19
7 Выбор напряжения	200
8 Построение картограммы электрических нагрузок	211
9 Предварительный выбор числа, мощности трансформаторов цеховых подстанций	233
10 Выбор схемы распределительной заводской сети и типа трансформатора на ГПП	244
11 Компенсация реактивной мощности	255
11.1 Составление уравнения баланса реактивной мощности	255
11.2 Выбор оптимальной мощности компенсирующих устройств	255
11.3 Выбор номинальной мощности устанавливаемых компенсирующих устройств	288
12 Окончательный выбор мощности трансформаторов КТП и проверка их на перегрузочную способность	300
12.1 Уточнение мощности трансформаторов с учетом компенсирующих устройств	300
12.2 Проверка трансформаторов на аварийную перегрузку	300
12.3 Выбор конструктивного исполнения КТП	311
13 Проектирование распределительной сети предприятия	322
13.1 Определение сечений проводов и кабелей и выбор основной	

аппаратуры	322
13.2 Выбор кабелей распределительной сети	333
14 Расчет токов короткого замыкания	388
15 Выбор и проверка оборудования на стороне 10 кВ	455
15.1 Выбор КРУ	455
15.2 Выбор выключателя ячейки ввода	455
15.3 Выбор выключателя ячейки секционирования	466
15.4 Выбор выключателя ячеек отходящих линий	466
15.5 Выбор выключателей нагрузки	466
16 Выбор главной схемы электрических соединений	477
16.1 Определение теплового импульса	477
17 Выбор оборудования на высокой стороне подстанции	488
17.1 Выбор и проверка проводников питающей линии	488
17.2 Выбор изоляторов	488
17.3 Выбор высокочастотного заградителя	488
17.4 Выбор ограничителя перенапряжений	49
17.5 Выбор разъединителей	49
17.6 Выбор и проверка высоковольтного выключателя	49
17.7 Выбор измерительных трансформаторов тока	500
17.8 Выбор и проверка аппаратов в нуле трансформатора	511
18 Выбор и проверка аппаратов на стороне низкого напряжения	522
18.1 Выбор и проверка шинного моста	522
18.2 Выбор и проверка опорных изоляторов	522
18.3 Выбор проверка проходных изоляторов	522
18.4 Выбор и проверка сборных шин	522
18.5 Выбор ячеек ввода, ячейки секционного выключателя и ячейки отходящей линии	533
18.6 Выбор и проверка выключателей КРУ	533
18.7 Выбор и проверка трансформаторов тока: ячейки ввода, ячейки секционного выключателя и отходящей линии	54

18.8 Выбор кабельной линии	576
18.9 Выбор трансформатора напряжения	577
18.10 Выбор предохранителей для защиты трансформатора напряжения	577
19 Релейная защита	58
20 Расчет заземления грозозащиты подстанции	600
20.1 Расчет заземляющих устройств	600
20.2 Грозозащита подстанции	633
Заключение	644
Список используемых источников	65

Введение

Электроэнергетика — это ведущая область энергетики, охватывающая производство электроэнергии на электростанциях и её доставку потребителям по линиям электропередачи, тем самым обеспечивая электрификацию потребителей.

Глобальные изменения, происходящие в настоящее время в мировой энергетике, реализуются не очень быстро. Развитие энергетики и электрификации в большей части определяет уровень развития народного хозяйства всей страны [17]-[18].

Хотя в современном мире роль сельского хозяйства перестала быть доминирующей в национальной экономике, оно по-прежнему остается очень важным ее сегментом. Обеспечение продовольственной безопасности страны полностью лежит на агропромышленном комплексе. Эффективность промышленности сельского хозяйства напрямую зависит от того, насколько развито именно сельскохозяйственное машиностроение в стране для функционирования сектора [16].

«В системе электроснабжения промышленных предприятий ставятся цели развития промышленности с помощью высокой интенсификации и улучшения эффективности производства благодаря ускорению научно-технического прогресса, что подразумевает повышение уровня проектно-конструкторских разработок, внедрение эксплуатации наиболее надежного оборудования, уменьшение непроизводительных расходов электрической энергии при ее передаче, распределении, а также потреблении.

Проектирование электроснабжения промышленных предприятий выполняется с учетом ряда требований, таких как:

- надежность;
- безопасность;
- удобство;
- обеспечение нужного уровня качества электроэнергии;

- бесперебойность работы системы как в обычном режиме, так и в послеаварийном;
- финансовая экономичность» [12-13].

Основные цели, которые необходимо достигнуть при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения промышленных предприятий, решаются путем оптимизации параметров этих систем с помощью правильного выбора номинальных напряжений, вариантов присоединений к энергосистеме, расчета электрических силовых нагрузок и требований к надёжности электроснабжения, выбора числа и мощности конструкций и схем распределительных электрических сетей и т.п.

Достижение этих целей усложняется в связи с ростом всего количества электрических приемников на промышленных предприятиях, новых разнообразных технологических процессов и т.д.

1 Общая характеристика предприятия

1.1 Особенности технологического процесса

На заводе сельскохозяйственного машиностроения осуществляются технологические процессы, состоящие на следующих этапах [15]:

1) заготовки деталей – литье, штамповка, ковка. Изготовление деталей происходит в заготовительных цехах: кузнечных, чугунолитейных, сталелийных, кузнечнопрессовых, кузнечно-штамповочных прессовых, литейных цветных металлов и пр.;

2) заготовки обрабатываются на металлорежущих станках, с помощью чего достигается получение деталей с нужными формами и размерами. Этот процесс происходит в обрабатывающих цехах: термических, механических, холодной штамповки, металлопокрытий, деревообрабатывающих, сборочных и пр.;

3) сборка заготовок – узлов, агрегатов или механизмов, а именно соединение отдельных частей в цельные единицы и агрегаты; на отдельных единичных производствах применяются слесарная обработка, а после пригонка элементов деталей к месту сборки; при серийном производстве эти работы производятся в малом объеме, а в массовом вовсе не применяются, потому что благодаря использованию предельных калибров при обработке на станках металлорежущих достигается взаимозаменяемость частей деталей. Сборка заготовок происходит в вспомогательных цехах;

4) итоговая сборка цельной машины;

5) испытание и регулирование машины происходит в испытательных цехах;

6) окраска машины состоит из нескольких действий, к примеру, шпаклевка, грунтовка и первая окраска обработанных частей деталей, окончательная окраска всей машины. Окраска и отделка происходит в специализированных окрасочных цехах.

На территории завода сельскохозяйственного машиностроения имеются также складские цеха (для инструмента, металла, формовочных материалов и пр.), энергетические установки (теплоэлектроцентраль, электростанция, компрессорные или газогенераторные устройства), различные транспортные устройства, санитарно-технические устройства (водоснабжение, отопление, вентиляция, канализация), общезаводские учреждения, лаборатории и устройства.

На данном производстве применяются станки разных видов: автоматизированные, специальные, универсальные, специализированные.

1.2 Характеристика окружающей среды производственных помещений

«По ПУЭ 7-е изд. по гололедообразованию город Оренбург относится к четвертому району. Нормативная толщина стенки гололеда 1 раз в 5 лет достигает 15 мм, а в 1 раз в 10 лет – 20 мм. Средняя продолжительность гроз в районе принимается - от 20 до 40 часов в 1 год. По скоростным напорам ветра город Оренбург относится ко третьему району. Скоростной напор ветра один раз в 5 лет достигает 45 м/с, а 1 раз в 10 лет 50 м/с» [9].

Проектирование электроснабжения завода сельскохозяйственного машиностроения возможно при знании особенностей производственной среды, и при исполнении четких формулировок всех требований, предъявляемых в действующих правилах устройств электроустановок (ПУЭ 7-е изд. [9]) и утвержденных норм технологического проектирования.

2 Определение силовых расчетных нагрузок ниже 1000 В

Расчет нагрузок выполняется с целью правильного выбора сечений линий и распределительных устройств, коммутационных и защитных аппаратов, числа и мощности трансформаторов на разных уровнях системы электроснабжения.

Данный расчет проводится методом коэффициента расчетной мощности[4].

1) для начала электроприемники группируются по категориям вне зависимости от их мощности. В первом столбце таблицы 2.1 формируются характерные группы электроприемников;

2) для каждой группы определяется необходимое число электроприемников;

3) определяется мощность каждого электроприемника, определяется мощность наименьшего и наибольшего, записывается в таблицу через дробь;

4) определяются $\cos\varphi$ и $K_{и}$;

5) определяются значения сменной мощности $P_{см}$ и $Q_{см}$:

$$P_{см} = K_{и} \cdot P_{н}, \quad (2.1)$$

$$Q_{см} = P_{см} \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (2.2)$$

б) определяется эффективное число электроприемников n_3 :

$$n_3 = \frac{2 \sum P_{н}}{P_{н.макс}}, \quad (2.3)$$

где $P_{н.макс}$ - мощность наиболее мощного электроприемника в группе.

$$n_3 = \frac{2 \cdot 896}{75} = 23$$

8) после определяется групповой коэффициент использования $K_{г}$

$$K_{г} = \frac{\Sigma P_{см}}{\Sigma P_{н}}, \quad (2.4)$$

$$K_{г} = \frac{288,385}{896} = 0,3$$

9) в одиннадцатом столбце коэффициент расчетной нагрузки выбирается в зависимости от $K_{г}$ и n_3 [6];

10) расчетная активная нагрузка цеха определяется по формуле:

$$P_p = \Sigma P_{см} \cdot K_p, \quad (2.5)$$

$$P_p = 288,385 \cdot 0,85 = 245,128 \text{ кВт}$$

11) реактивная расчетная нагрузка (при $n_3 \geq 10$):

$$Q_p = \Sigma Q_{см}, \quad (2.6)$$

$$Q_p = 238,347 \text{ квар}$$

12) полная мощность определяется:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}, \quad (2.7)$$

$$S_p = \sqrt{245,128^2 + 238,347^2} = 341,9 \text{ кВА}$$

13) далее определяется расчетный ток по формуле:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_H} \quad (2.8)$$

где U_H - номинальное напряжение ступени распределения.

$$I_p = \frac{341,9}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 519,47 \text{ A}$$

Помимо данного метода расчета на практике применяются и другие альтернативные, такие как, метод коэффициента спроса, вероятностный метод, метод удельной мощности.

Результаты расчета силовых нагрузок для всех электроприемников цехов сводятся в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 - Определение нагрузки силовых электроприемников цеха

Исходные данные				Справочные Данные			P _{см} , кВт	Q _{см} , кВАр	n _э	K _р	P _р , кВт	Q _р ,кВАр	S _р ,кВ А	I _р , А
Наименование ЭП	Кол- во ЭП, шт	Номинальная мощность ЭП, кВт		Ки	cosφ	Tgφ								
		Об- щая P _н	Одно- го P _{нмин} ÷ P _{нмах}											
1	2	3	4	5	6		7	8	10	11	12	13	14	15
Универсальные станки	40	154,6	55	0,14	0,5	1,74	22,7	36,5	23	0,85				
Станки агрегатные	58	192,3	33	0,2	0,6	1,27	33,5	39						
Вентиляторы	10	28,4	14	0,7	0,8	0,7	22,7	18						
Кран-балки	11	39	11	0,1	0,5	1,7	2,5	4,1						
Преобразователи	1	41	28	0,8	0,8	0,76	29,4	21						
Электрические печи	3	238	74	0,6	0,9	0,32	118,5	40						
Электродуговая сварка	9	198	76	0,4	0,5	1,34	62,3	81,4						
ИТОГО	137	889					288,4	238,4						

3 Определение осветительных нагрузок

Расчет для цеха №1 проводится методом удельной мощности на единицу площади

1) площадь цехов с осветительной нагрузкой по плану предприятия равна $S = 3591 \text{ м}^2$;

2) расчетная высота определяется по формуле:

$$h = H - h_c - h_p \quad (3.1)$$

где H – высота помещения;

h_p – высота рабочей поверхности;

h_c – высота свеса светильника.

$$h = 10 - 1,2 - 0,8 = 8 \text{ м}$$

3) определяются минимальная освещенность и коэффициент запаса. $E_{\text{мин}} = 400 \text{ Лк}$; $k_{\text{зап}} = 1,5$ (при освещении газоразрядными лампами);

4) для общего освещения производственных помещений используется типовой светильник РСП13;

5) коэффициент мощности для используемого типа лампы - $\cos\varphi = 0,85$, $\text{tg}\varphi = 0,62$;

6) расчетная активная мощность осветительной установки равна:

$$P_{po} = S \cdot P_i, \quad (3.2)$$

$$P_{po} = 3591 \cdot 0,0136 = 48,837 \text{ кВт}$$

7) расчетная реактивная мощность равна:

$$Q_{po} = 48,837 \cdot 0,62 = 30,279 \text{ квар}$$

Таблица 3.1– Расчет мощности осветительной нагрузки

№ ген-плана	Наименование цеха	F, м ²	E _{норм} , Лк	Руд.о., кВт/м ²	Тип ламп	cosφ	tgφ	Pi кВт/м ²	Po, кВт	Qo квар	So, кВА
1	Главный корпус	3591	400	0,0034	дрл	0,7	0,62	0,0136	48,8	49,8	69,8
2	Литейный цех	1670	200	0,0034	дрл	0,5	0,62	0,0067	11,4	19,8	23,8
3	Кузнечный цех	1090	200	0,0042	дрл	0,7	0,62	0,0083	8,8	7,8	10,8
4	Экспериментальный цех	1900	300	0,0034	дрл	0,7	0,62	0,0104	19,4	19,8	27,7
5	Компрессорная	620	200	0,0042	дрл	0,8	0,62	0,0083	5,3	3,8	6,4
6	Склад	1630	50	0,0034	дрл	0,8	0,62	0,0015	2,8	2	3,5
7	Насосная	620	200	0,0042	дрл	0,8	0,62	0,0083	5,3	3,8	6,4
8	Склад сжатых газов	260	75	0,0054	дрл	0,8	0,62	0,0041	1,2	0,8	1,5
9	Склад химикатов	4230	75	0,0034	дрл	0,8	0,33	0,0026	10,6	8,2	12,5
10	Заводуправление и столовая	1750	200	0,0022	лл	0,9	0,33	0,0045	8,1	3,8	9,9
11	Блок вспомогательных цехов	2150	200	0,0034	дрл	0,7	-	0,0067	14,6	14,8	20,5
12	ЦЗЛ	570	300	0,0022	лл	0,8	0,33	0,0068	4,2	3,2	5,2
13	Гараж	970	50	0,0042	дрл	0,7	0,62	0,0022	2,1	2,1	2,5
14	Ремонтно-механический цех	1970	200	0,0034	дрл	0,8	0,62	0,0067	13,2	8,2	15,9
15	Механосборочный цех	8059	300	0,0034	дрл	0,8	0,62	0,0103	82,2	61,8	101,8
	Освещение территории	68170		0,0002		0,8		0,0002	13,6	8,5	16
Итого									251,4	218,2	335,6

4 Определение расчетных нагрузок ниже 1000 В цехов предприятия

Расчетная нагрузка каждого из цехов равна сумме нагрузок силовой и осветительной:

$$P_{рцi} = P_{рси} + P_{роi}, \quad (4.1)$$

$$Q_{рцi} = Q_{рси} + Q_{роi}, \quad (4.2)$$

$$S_{рцi} = \sqrt{P_{рцi}^2 + Q_{рцi}^2}. \quad (4.3)$$

Цех 1:

$P_{рс1} = 600$ кВт; $Q_{рс1} = 428,48$ квар.

$P_{ро1} = 48,8$ кВт; $Q_{ро1} = 49,8$ квар.

$$P_{рц1} = 600 + 48,837 = 648,837 \text{ кВт}$$

$$Q_{рц1} = 428,48 + 49,824 = 478,3 \text{ квар}$$

$$S_{рц1} = \sqrt{648,837^2 + 478,3^2} = 807 \text{ кВА}$$

Для остальных цехов расчет аналогичен и сводится в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 - Результаты расчетов мощности цехов с учетом осветительной нагрузки

№ генплана	Наименование цеха	P_p , кВт	Q_p , квар	P_o , кВт	Q_o , квар	P_{pc} , кВт	Q_{pc} , квар	S_{pc} , кВА
1	Главный корпус	600	428,486	48,8376	49,824	648,83	478,31	807,06
2	Литейный цех	784,5	596,3	12,4	18,7	795,6	615,6	1007,8
3	Кузнечный цех	631	416,9	8,9	7,21	638,6	424,5	765,1
4	Экспериментальный цех	482,1	362,6	18,4	18,8	502,4	382,2	632,5
5	Компрессорная	82	48,2	5,2	3,9	85,4	52,7	98,75
6	Склад	43	27,3	2,7	2,2	47,8	28,6	54,9
7	Насосная	126	75,8	5,2	3,8	133,6	81,6	154,3
8	Склад сжатых газов	104	60,6	2	0,9	102,1	61,2	118
9	Склад химикатов	18	12,2	10,8	8,2	30,5	20,1	36,8
10	Заводоуправление и столовая	242	103,6	7,9	3,6	248,2	107,5	271,7
11	Блок вспомогательных цехов	681,4	484,9	14,6	15,6	695,9	501,5	855,9
12	ЦЗЛ	298	180,5	4,2	3,2	303	182	355,8
13	Гараж	11	8,6	1,8	2,1	14	10,5	16,5
14	Ремонтно-механический цех	246	238,7	14,5	7,3	257,6	246,7	357,9
15	Механосборочный цех	271	161	82,2	61,7	351,2	224,1	417,5
	Наружное освещение			13,634	8,45	13,6	8,45	16,04
	Итого					4869,5	3424,986	5971,583

5 Определение расчетных нагрузок предприятия выше 1000 В

Электроприемники категории напряжением выше 1000 В на предприятии: индукционные печи и синхронные двигатели напряжением 10 кВ, которые установлены в цехах №5, 7, 2.

$$P_p = K_3 \cdot P_n, \quad (5.1)$$

где K_3 – коэффициент загрузки электроприемника.

Для цеха №2 выбираются две индукционные плавильные печи типа ИСТ с емкостью 6 тонн, $\cos\varphi=0,85$; $K_3=0,85\div 0,9$; $P_n=2330$ кВт. [4]

Для цеха №5 выбираются два синхронных двигателя марки СДК2-19-39-16УХЛ4, $\cos\varphi=0,9$; $P_n=2000$ кВт.

Для цеха №7 выбираются два асинхронных двигателя АОД-1250-4У1, $\cos\varphi=0,9$; $P_n=1250$ кВт.

Цех №2:

$$P_{p6} = 0,9 \cdot 4660 = 4194 \text{ кВт}$$

$$Q_{p6} = 0,62 \cdot 4194 = 2599,2 \text{ квар}$$

Таблица 5.1 - Результаты расчётов нагрузок выше 1000 В

№	Цех	Руст, кВт	n	Кз	cos φ	tg φ	Рр, кВт	Qр, квар	Sp, кВА
2	Термический ИСТ-6/2,33	2330	2	0,9	0,85	0,62	4194	2598,2	4934,2
5	Компрессорная СДК2-19-39- 16УХЛ4	2000	2	0,9	0,9	-0,48	3600	-1744,5	4000
7	Насосная АОД-1250-4У1	1250	2	0,9	0,8	0,75	2250	1687,5	2811,5
Итого							10044	2543,15	11746,7

6 Определение расчетной нагрузки предприятия

Суммарная активная мощность предприятия:

$$P_{P3(6)10кВ} = (\sum P_{pцi})_{0,4кВ} \cdot K_{рм} + \Delta P_{л,м} + \sum P_{P(6)10кВ}, \quad (6.1)$$

где P_{P3} – суммарная нагрузка предприятия 10 кВ ГПП;

$\sum P_{pцi}$ – расчетная нагрузка цехов предприятия (ниже 1000 В);

$K_{рм}$ - коэффициент разновременности (0.8÷1.0);

$\Delta P_{л,м}$ – потери активной мощности в линиях и трансформаторах;

$\sum P_{P(6)10кВ}$ – суммарная нагрузка.

Суммарная реактивная мощность предприятия :

$$\sum Q_{P3(6)10кВ} = (\sum Q_{pцi})_{0,4кВ} \cdot K_{рм} + \Delta Q_{л,м} + \sum Q_{P(6)10кВ} \quad (6.2)$$

$$P_{P310кВ} = 4869,489 \cdot 1 + (0,03 \cdot (4869,489 + 10044) + 0,02 \cdot (5971,583)) + 10044 = 15480,33 \text{ кВт}$$

$$Q_{P310кВ} = 3424,986 \cdot 1 + (0,1 \cdot 5971,583 + 0,03 \cdot (3424,986 + 2543,148)) + 2543,148 = 6744,337 \text{ квар}$$

Суммарная мощность предприятия:

$$S_{P310кВ} = \sqrt{15480,33^2 + 6744,337^2} = 16885,69 \text{ кВА}.$$

7 Выбор напряжения

Выбор напряжения осуществляется в зависимости расчетной нагрузки, удаленности от источника питания, наличием сторонних потребителей, перспективой развития и т.д.

Рациональное напряжение определяется по формуле:

$$U_{рац} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{L} + \frac{2500}{P}}}, \quad (7.1)$$

где L – длина всей линии, км;

P – активная мощность, МВт.

$$U_{рац} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{5,2} + \frac{2500}{15,48}}} = 62,5 \text{ кВ}$$

Питающая линия принимается напряжением 110 кВ.

Напряжение распределительной сети проектируемого предприятия принимается 10 кВ.

8 Построение картограммы электрических нагрузок

В целях экономии электроэнергии цеховые подстанции, ГПП и распределительные подстанции следует устанавливать в центре электрических нагрузок цехов предприятия. Определяются расчетные нагрузки цехов:

$$P_i = \pi \cdot r_i^2 \cdot m, \quad (8.1)$$

где P_i – мощность i -го цеха;

m – масштаб для определения площади круга.

Центр электрических нагрузок (ЦЭН) – это центр тяжести фигуры (цеха на генплане). Для нахождения ЦЭН необходимо определить центр тяжести масс:

$$X_{цэн} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot X_i}{\sum_{i=1}^n P_i}; \quad (8.2)$$

$$Y_{цэн} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^n P_i}, \quad (8.3)$$

где P_i – расчетная нагрузка каждого цеха;

X_i, Y_i – координаты.

На генплане отдельными кругами изображаются нагрузки до 1000 В и нагрузки выше 1000 В. Угол α определяется из соотношения активных расчетных нагрузок цехов:

$$\alpha_{locв}^0 = \frac{P_{p.осв}}{\sum P_6} \cdot 360^0 \quad (8.4)$$

Для цеха №1:

$$r_1 = \sqrt{\frac{648,84}{3,14 \cdot 0,5}} = 20,33 \text{ м}$$

$$\alpha_{10св}^{\circ} = \frac{48,83}{648,83} \cdot 360^{\circ} = 27^{\circ}$$

Расчет для остальных цехов предприятия ведется аналогично. Наглядно картограмма нагрузок представлена на 2 листе графической части.

Таблица 8.1 - Расчет картограммы

№ ген плана	Наименование цеха	Координаты цеха		Расчетная нагрузка цехов ниже 1000 В		ЦЭН		Радиус круга	Угол сектора
		X _i , м	Y _i , м	P _{ро} кВт	P _{рц} кВт	X _i , м	Y _i , м		
1	Главный корпус	157	120	48,8	647,8	142	205	20,2	27
2	Литейный цех	157	191	11,5	796,8			22,6	5
3	Кузнечный цех	157	191	8,7	638,5			20,1	5,1
4	Эксперимент цех	226	192	19,5	501,5			18,2	15
5	Компрессорная	328	221	5,1	86,2			7,2	22
6	Склад	206	62	2,8	46,7			5,6	21
7	Насосная	206	62	5,1	133			9,3	14
8	Склад сжатых газов	315	182	1,1	102			8,1	4
9	Склад химикатов	55	60	10,8	32			4,3	125
10	Заводоуправление и столовая	55	60	8,2	246			12,6	12
11	Блок всп. цехов	44	133	14,4	694			21,2	8
12	ЦЗЛ	62	192	4,1	304,1			14,2	5
13	Гараж	132	17	1,9	15			3,1	52
14	Ремонтно-механический цех	92	120	14	258			12,7	18
15	Механосборочный цех	184	18	82	353			15	85

9 Предварительный выбор числа, мощности трансформаторов цеховых подстанций

Количество трансформаторов определяется категорийностью.

Определяется мощность цеховых трансформаторов:

$$S_{номт} \geq \frac{S_p}{n \cdot K_з}, \quad (9.1)$$

где $S_{ном}$ - номинальная мощность трансформатора;

$K_з$ - коэффициент загрузки трансформаторов;

n – число трансформаторов цеховой подстанции.

$$S_{оп} = \frac{1007,98}{0,7 \cdot 2} = 719,99 \text{ кВА}$$

Подходящая стандартная мощность трансформатора равна 1000 кВА.

Таблица 9.1 – Предварительный выбор цеховых трансформаторов

Наименование пункта питания	Наименование потребителей	Расчетная нагрузка			Категория потребителей	Количество трансформаторов	Коэффициент загрузки, $K_з$	Расчетная мощность трансформатора, $S_{т}$, кВА	Номинальная мощность трансформатора, $S_{шт}$, кВА
		$P_{рц}$, кВт	$Q_{рц}$, кВАр	$S_{рц}$, кВА					
ТП1	Цех	795,8	615,8	1006,2	1	2	0,7	719,99	1000
ТП2	Цех	637,8	425,5	767,1	1	2	0,7	548	630
ТП3	Цеха 8,9,11	827,9	582,7	1011,9	2,3,3	2	0,8	631,5	630
ТП4	Цеха 4,6	551	410,2	686,8	2,3	2	0,8	430	630
ТП5	Цеха	649	477,3	805	1	2	0,7	504	630
ТП6	Цеха 13,14,15	623,8	482	787,5	2,3,1	2	0,8	496	630
ТП7	Цеха 5,7,10,12 наружное освещение	785	432,5	894,2	3,2,1	2	0,8	548	630
РП1	ВН нагрузка цехов 5,7, ТП-6 и ТП-7	7260	857	7308,2					

10 Выбор схемы распределительной заводской сети и типа трансформатора на ГПП

Внутри предприятия электрические сети выполняются по радиальным, магистральным или смешанным схемам. Схема выбирается по критериям: категория надежности потребителей электрической энергии, их территориальным размещением и мощностью, а также особенностями режимов работы.

Питание ТП 10/0,4 кВ выполняется от секций 10 кВ подстанций промышленного предприятия ГПП кабельными линиями по магистральной схеме.

Питание электроприемников на напряжение 10 кВ (высоковольтных синхронных и асинхронных двигателей, печей) обычно выполняется радиальными кабельными линиями.

Номинальная мощность трансформаторов рассчитывается по нагрузке по формуле (9.1):

$$S_{номт} \geq \frac{16885}{2 \cdot 0,7} = 12061 \text{ кВА}$$

Расчетная мощность трансформатора округляется до стандартной

$$S_{номт} = 16000 \text{ кВА}.$$

Таблица 10.1 – Предварительный выбор мощности трансформатора на ГПП

Тип трансформатора	S _{нт} , кВА	Номинальное напряжение обмоток, кВ		ΔP _{хх} , кВт	ΔP _{кз} , кВт	U _к , %	I _{хх} , %	Пределы регулирования напряжения, %
		ВН	НН					
ТДН-16000/110	16000	110	10	18	85	10,5	0,7	±9*1,78

11 Компенсация реактивной мощности

11.1 Составление уравнения баланса реактивной мощности

Уравнение баланса реактивной мощности выглядит следующим образом:

$$Q_{\Sigma} = Q_p - Q_{сд} - Q_{ку} \quad (11.1)$$

Реактивная мощность, выдаваемая энергосистемой равна расчетной мощности потребителей с вычетом мощности, выдаваемой синхронными двигателями и мощности компенсирующих устройств.

$$Q_{сд} = \frac{K_{пер} \cdot P_{сдном} \cdot tg\varphi}{\eta} \quad (11.2)$$

где $K_{пер}$ – коэффициент перегрузки СД, равен 1,2 [4].

$$Q_{сдк} = \frac{1,2 \cdot 4000 \cdot 0,48}{0,95} = 2412,56 \text{ квар}$$

11.2 Выбор оптимальной мощности компенсирующих устройств

Расчетная реактивная мощность с учетом СД:

$$Q_{p-сд} = Q_p - Q_{сд}, \quad (11.3)$$

$$Q_{p-сд} = 6744,34 - 2412,5 = 4331,78 \text{ квар}$$

Определение оптимальной мощности КУ [5]:

$$Z = \frac{(Q_{p-сд} - Q_{ку})^2}{U^2} \cdot R \cdot c_o + z'_k \cdot Q_{ку}, \quad (11.4)$$

где $Q_{ку}$ – мощность компенсирующего устройства, квар;

R - эквивалентное сопротивление, Ом;

c_o – средняя стоимость покупки электроэнергии (0,52 руб/кВт·ч);

z'_k – удельные затраты на производство 1 квар [13].

Эквивалентное сопротивление:

$$R = R_{гпп} + R_{пит.л}, \quad (11.5)$$

где $R_{гпп}$ - сопротивление трансформатора, приведённое к стороне 10 кВ, Ом;

$R_{пит.л}$ - сопротивление питающей линии, также приведённое к стороне 10 кВ.

Сопротивление трансформаторов ГПП на стороне НН:

$$R_{гпп} = \frac{\Delta P_{кз} \cdot U_{нн}^2}{S_{ном}^2}, \quad (11.6)$$

$$R_{гпп} = \frac{85 \cdot 10^2}{16^2} = 33,203 \text{ Ом.}$$

В результате функция затрат имеет вид:

$$Z = \frac{(4331,777 - Q_{опт.ку})^2}{10^2} \cdot 33,203 \cdot 0,52 + 750 \cdot Q_{опт.ку}, \quad (11.7)$$

Оптимальная мощность КУ по результатам расчета равна 2064 кВАр.
Минимум затрат равен 2445200 рублей.

Потребляемая реактивная мощность с учетом КУ составит:

$$Q_{\text{э}} = Q_{\text{р-сд}} - Q_{\text{опт.ку}}, \quad (11.8)$$

$$Q = 4331,77 - 2064 = 2267,77 \text{ кВАр.}$$

Суммарная реактивная нагрузка:

$$Q_{\Sigma\text{р}} = \sum Q_{\text{р}i}; \quad (11.9)$$

где $Q_{\text{р}i}$ – расчетная реактивная нагрузка i -го цеха, кВАр.

$$Q_{\Sigma\text{р}} = 7711,6 \text{ кВАр.}$$

Коэффициент распределения:

$$\Delta_i = \frac{Q_i}{Q_{\Sigma\text{р}}}; \quad (11.10)$$

где Q_i – расчетная реактивная нагрузка i -го цеха, кВАр.

Требуемая мощность i -го цеха:

$$Q_{\text{тр.ку}i} = Q_{\text{опт.ку}} \cdot \Delta_i; \quad (11.11)$$

Требуемая реактивная мощность, генерируемая i -го цеха:

$$Q_{\text{тр.сд}i} = Q_{\Sigma\text{сд}} \cdot \Delta_i; \quad (11.12)$$

Для цеха № 1:

$$\Delta_1 = \frac{478,3103}{7711,686} = 0,062;$$

$$Q_{\text{тр.ку}i} = 2064 \cdot 0,062 = 128 \text{ кВАр};$$

$$Q_{\text{тр.сд}i} = 2412,56 \cdot 0,062 = 149,63 \text{ кВАр.}$$

Для остальных цехов расчет производится аналогично. Результаты сводятся в таблицу 11.1.

Таблица 11.1 - Результаты расчетов

Номер цеха	Весовой коэффициент	Требуемая мощность, кВАр	Требуемая мощность, генерируемая, кВАр
1	0,062024	128,0177	149,6368
2	0,079851	164,8128	192,6457
3	0,055048	113,62	132,8077
4	0,049558	102,2868	119,5606
5	0,006727	13,88399	16,22866
6	0,003769	7,779258	9,092987
7	0,010461	21,59219	25,23859
8	0,007886	16,27734	19,0262
9	0,002608	5,382088	6,290994
10	0,014068	29,03703	33,94068
11	0,064935	134,0263	156,6601
12	0,02373	48,97957	57,25105
13	0,001372	2,831093	3,309197
14	0,031989	66,02586	77,17604
15	0,029007	59,86957	69,9801
ВН ЭП цеха № 2	0,444129	916,683	1071,489
ВН ЭП цеха № 7	0,218824	451,6522	527,9254

11.3 Выбор номинальной мощности устанавливаемых компенсирующих устройств

Мощность КУ, устанавливаемых на предприятии, определяется по суммарной мощности КУ цехов, подключенных к каждой из ТП. От количества шин ТП цеха зависит количество устанавливаемых батарей конденсаторов. Мощность КУ, устанавливаемых для ТП №3 равна требуемым мощностям КУ в 8, 9 и 11 цехах.

$$Q_{\text{тр.куз}} = 16,27 + 5,38 + 134 = 155,685 \text{ кВАр.}$$

Следовательно, на ТП № 3 принимается к установке два низковольтных конденсатора НС-75.

Генерируемая реактивная мощность СД, которая распределена между рассматриваемыми цехами равна:

$$Q_{\text{тр.сдз}} = 19 + 6,29 + 156,66 = 181,97 \text{ кВАр.}$$

Результирующая реактивная мощность ТП № 3 после КРМ:

$$Q_{\text{р.лк}} = 60,816 + 20,109 + 500,759 - 2 * 75 - 181,97 = 249,7 \text{ кВАр.}$$

Результирующая полная мощность ТП № 3 после КРМ:

$$S_{\text{р.лк}} = \sqrt{P_{\text{р}}^2 + Q_{\text{р.лк}}^2} \quad (11.13)$$

$$S_{\text{р.лк}} = \sqrt{826,866^2 + 249,7^2} = 863,75 \text{ кВА.}$$

Находим $tg\varphi$ и сравниваем его с предельно допустимым (0,35):

$$tg\varphi = \frac{249,7}{826,866} = 0,3.$$

Таблица 11.2 - Результат расчетов выбора оптимальной мощности КУ

Место установки КУ	$P_{\text{р}}$, кВт	$Q_{\text{тр.ку}}$, кВАр	$Q_{\text{тр.сд}}$, кВАр	$Q_{\text{ном.ку}}$, кВАр	$Q_{\text{р.лк}}$, кВАр	$S_{\text{р.лк}}$, кВА	$tg\varphi$
ТП1	795,8	164,8	192,64	160	263,14	838,2	0,33
ТП2	638,85	113,6	132,87	120	171,7	661,5	0,268
ТП3	826,86	155	181,97	150	249,7	863,7	0,3
ТП4	550,32	110	128,65	120	162,584	573,8	0,295
ТП5	648,8	128	174,87	150	234,10	816,29	0,299
ТП6	624,8	128,7	166,69	150	216,14	742	0,3
ТП7	783,97	115,75	93,835	120	86,106	572,15	0,15
ВН ЭП цеха №2	4194	695,66	813,148	900	886,059	4286,5	0,21
ВН ЭП цеха №7	2250	451,65	527,925	450	709,57	2359,2	0,315
Итого				2320	2978,13	11723,7	-

12 Окончательный выбор мощности трансформаторов КТП и проверка их на перегрузочную способность

12.1 Уточнение мощности трансформаторов с учетом компенсирующих устройств

Полная расчетная мощность предприятия с учетом компенсации рассчитывается по формуле:

$$S'_{pz} = \sqrt{P_{pz}^2 + (Q_{pz} - Q_{бкн} - Q_{сд})^2} \quad (12.1)$$

$$S'_{pz} = \sqrt{15480,33^2 + (6744,337 - 2320 - 2412,56)^2} = 15610,5 \text{ кВА}$$

$$S_{номт} \geq \frac{15610,5}{2 \cdot 0,7} = 11150 \text{ кВА}$$

Выбранные на ГПП трансформаторы соответствуют неравенству.

Расчет уточнения мощности не производится для ТП, так как компенсация реактивной мощности влияет незначительно на мощность трансформаторов.

12.2 Проверка трансформаторов на аварийную перегрузку

Проверка выполняется с помощью суточного графика нагрузки для промышленности.

Определяется коэффициента начальной аварийной перегрузки:

$$K_{нт.ав}^* = \frac{S_{нт}}{S_M} \quad (12.2)$$

$$K_{\text{нт.ав}}^* = \frac{16000}{11713,7} = 1,36$$

Трансформаторы ГПП не испытывают аварийных перегрузок.

Для ТП №1 при эквивалентной температуре для Оренбурга 12 °С, продолжительности перегрузки по графику $h = 1$ ч, для системы охлаждения М, коэффициент аварийной перегрузки равен $K_{\text{ав}} = 1,9$. Аварийная перегрузка равна $S_{\text{ав}} = 1007,9$ и не превышает допустимое значение 1900.

Расчет для остальных ТП производится аналогично и сводится в таблице 12.1.

Таблица 12.1 – Проверка тр-ров КТП на аварийную перегрузку

№ ТП	$S_{\text{нт}}$, кВА	S_p ,кВА	$t_{\text{ав}}$,ч	K_2 доп.ав	$S_{\text{доп}}$, кВА
ТП1	1000	1008,9	1	1,9	1900
ТП2	630	767,2	3	1,4	880
ТП3	630	1012,7	13	1,3	880
ТП4	630	686,6	1	1,9	1010
ТП5	630	806	10	1,3	880
ТП6	630	793	10	1,3	880
ТП7	630	896,1	10	1,3	880

12.3 Выбор конструктивного исполнения КТП

Принимается 2КТП-400 10/0,4 кВ – комплектная трансформаторная подстанция внутренней установки, производимая Орским заводом электро-монтажных изделий [3].

13 Проектирование распределительной сети предприятия

Распределительная сеть выполняется прокладкой кабелей в земле (в траншеях) по территории промышленного предприятия.

13.1 Определение сечений проводов и кабелей и выбор основной аппаратуры

Определяется сечение питающей линии:

$$F_{\text{э}} = \frac{I_p}{j_{\text{э}}} \quad (13.1)$$

где I_p – расчетный ток питающей линии, А;

$j_{\text{э}}$ – экономическая плотность тока, А/мм².

$$T_M = \frac{\sum P_i \cdot T_i}{P_{\text{max}}}, \quad (13.2)$$

$$T_M = \frac{15480,33 \cdot (1 \cdot 181 + 0,9 \cdot 543 + 0,8 \cdot 1267 + 0,7 \cdot 911 + 0,6 \cdot 1086 + 0,5 \cdot 2380 + 0,4 \cdot 2392)}{15480,33} = 5119,34$$

Экономическая плотность тока равна $j_{\text{э}}=1,0$ А/мм².

Определяется расчетный ток:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot n \cdot U_{\text{HH}}} \quad (13.3)$$

где S_p – расчетная мощность, МВА;

n – число параллельных цепей.

$$I_p = \frac{15610,5}{2\sqrt{3} \cdot 110} = 40,96 \text{ A}$$

$$F_s = \frac{40,96}{1,0} = 40,96 \text{ мм}^2$$

Принимается ближайшее стандартное значения при учете минимальных сечений по короне, а также расположении на одной опоре двух цепей $F_{ст} = 120 \text{ мм}^2$

По условиям ветровой нагрузки и гололедообразования минимально допустимое сечение провода равно 120 мм^2 . [9]

Проверка выбранного сечения осуществляется по нагреву, когда в аварийном режиме одна из цепей отключена:

$$I_{дл.доп} \geq I_{ав} \quad (13.4)$$

где $I_{дл.доп}$ – длительно допустимый ток выбранного сечения, А;

$I_{ав}$ – аварийный ток, равный:

$$I_{ав} = 2 \cdot I_p \quad (13.5)$$

$$I_{ав} = 2 \cdot 40,96 = 81,92 \text{ A}$$

Длительно допустимый ток для провода марки АС-120 равен 380А [9].

$$380 \text{ A} > 81,92 \text{ A}$$

Условие проверки выполняется.

На электродинамическое и термическое действие токов короткого замыкания провода воздушной линии не проверяются.

13.2 Выбор кабелей распределительной сети

13.2.1 Расчет кабельных линий напряжением выше 1000 В

Для распределительной сети принимается силовой кабель марки АПвП с изоляцией из СПЭ.

В насосную прокладывается кабель марки АПвПг с герметизацией, так как в цехе производственная среда - влажная.

Расчетный ток для кабеля, питающего ТП №1 равен:

$$I_p = \frac{1008,8}{2\sqrt{3} \cdot 10} = 29 \text{ A}$$

Экономическая плотность тока для кабелей с изоляцией и $T_m = 5119,34$ равна 1,6 А/мм²[9].

Сечение кабеля определяется по формуле (13.1):

$$F_{\text{расч}} = \frac{29}{1,6} = 18,18 \text{ мм}^2$$

Принимается кабель сечением 25 мм².

Проверка выбранных кабелей осуществляется по допустимому току:

$$I_{\text{max}} \leq I'_{\text{дл.доп}}, \quad (13.6)$$

где I_{max} – максимальный ток, который может протекать по кабелю;

$I'_{\text{дл.доп}}$ – длительно допустимый ток, который включает в себя поправки на число кабелей, положенных рядом и на температуру окружающей среды:

$$I'_{\text{дл.доп}} = K_1 \cdot K_2 \cdot I_{\text{дл.доп}}, \quad (13.7)$$

где K_1 - поправочный коэффициент, зависящий от температуры окружающей среды;

K_2 - поправочный коэффициент, который зависит от способа прокладки проводников.

$$1,04 \cdot 0,75 \cdot 97 \geq 2 \cdot 29$$

$$75,66 \geq 58$$

Условие термической стойкости рассчитывается по формуле:

$$F_{min} = \frac{\sqrt{B_k}}{C} \quad (13.8)$$

где C – постоянная, для кабелей с СПЭ изоляцией равна 95;

B_k – тепловой импульс, определяется по формуле:

$$B_k = I_{n0}^2 \cdot t_{кз} \quad (13.9)$$

где $t_{кз}$ - время, в течение которого протекает ток короткого замыкания.

Для ТП №1 - ТП №3:

$$50 \geq \frac{\sqrt{6460000}}{95},$$

$$50 \text{ мм}^2 \geq 26,75 \text{ мм}^2.$$

Условие проверки выполняется.

Расчеты для всех участков производятся аналогично и сводятся в таблицу 13.1.

13.2.2 Расчет кабельных линий напряжением ниже 1000 В

Для заводской сети напряжением ниже 1000 В сечение кабельных линий выбирают по нагреву длительным расчетным током.

Для кабеля от РП1 до цеха №5:

$$I_p = \frac{99,75}{1 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,4} = 71,99 \text{ А}$$

Для двух кабелей при однослойной прокладке принимается $k_1 = 0,9$.

При температуре окружающей среды 15°C и прокладке в земле принимается $k_2 = 1$, а при кппа прокладке в вести воздухе $k_2 = 1,09$.

Если кабель четырехжильный поправочный коэффициент равен 0,92.

$$I'_{дл.дон} = 0,9 \cdot 0,92 \cdot 197 = 163,116 \text{ А}$$

$$163,116 \text{ А} > 143,98 \text{ А}$$

Принимается кабель силовой марки АВВБ с изоляцией из ПВХ.

Результаты данного расчета сводятся в таблицу 13.2.

Далее принятые кабели проверяются по допустимой потере напряжения.

Для этого рассчитывается потеря напряжения фазная по формуле:

$$\Delta U_{\phi} = \frac{I \cdot r \cdot \cos \varphi + I \cdot x \cdot \sin \varphi}{U_{ном}} \cdot 100 \quad (13.10)$$

где r - активное сопротивление кабельной линии, Ом;

x - индуктивное сопротивление кабельной линии, Ом

Междуфазная потеря напряжения определяется по формуле:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot \Delta U_{\phi}, \quad (13.11)$$

$$\Delta U \leq \Delta U_{доп}. \quad (13.12)$$

Производится расчет для цеха № 8.

Для кабеля марки АВВБ-4х120 погонные сопротивления равны 0,332 и 0,131 Ом/км.

Длина кабельной линии равна 60 метров.

$$\Delta U_{\phi\%} = \frac{170,3 \cdot 0,57 \cdot 0,06 \cdot 0,8 + 170,3 \cdot 0,141 \cdot 0,06 \cdot 0,6}{380} \cdot 100 = 1,45 \%,$$

$$\Delta U_{\phi\%} = \sqrt{3} \cdot 1,45 = 2,5 \%,$$

$$2,5 \% \leq 5 \%,$$

Условие выполняется, соответственно, кабель удовлетворяет условию проверки по потере напряжения.

Таблица 13.1 – Выбор и проверка кабельных линий 10 кВ

Участки сети	S_p , кВА	I_p , А	Кол каб.	K1	K2	F_p , мм ²	$F_{см}$, мм ²	Идл. до п, А	Гдл. до оп, А	$I_{ав}$, А	$F_{см}$, мм ²	Идл. до п, А	F_{min} , мм ²	$F_{прин}$
ГПП-РП1	6812,5	221	2	1,13	0,75	131,8	150	392	277,7	422	240	531	40,1	240
ГПП-ПЕЧЬ	4286	123,7	2	0,88	0,75	77,3	95	252	197,3	247	240	422	40,1	185
ГПП-ТП1	838,1	23,2	2	1,04	0,75	14	50	171	112,3	48,5	50	170	118,5	120
ГПП-ТП2	661,6	20	2	0,88	0,75	12	50	172	132,5	37,2	50	170	118,5	120
ТП1-ТП3	863,5	23,9	2	1,13	0,9	15,6	50	184	160	50	50	185	26,75	50
ТП2-ТП4	574,8	16,6	2	1,04	0,9	11,3	50	172	132,5	32	50	170	38,27	50
ТП3-ТП5	816,7	23,4	2	1,04	0,9	15	50	172	132,5	46,7	50	170	36,25	50
РП1-ТП6	742,2	22,4	2	1,04	0,9	14,4	50	172	132,5	43,8	50	170	40,1	50
РП1-ТП7	571,2	16,6	2	1,04	0,9	11,3	50	172	132,5	33,2	50	170	40,1	50
РП1-СД	4000	114,4	2	1,04	0,9	71	70	210	163,4	232	150	322	40,1	150
РП1-АД	2360	67	2	1,04	0,9	43,5	50	172	132,2	135	70	210	40,1	150

Таблица 13.2 – Выбор кабельных линий 0,4 кВ

Участки сети	Длина КЛ, м	S_p , кВА	I_p , А	Кол-во кабелей	Материал токопроводящей жилы	K_1	K_2	Идл. доп., А	Гдл. доп., А	$I_{ав}$, А	$F_{см}$, мм ²	ΔU , %
ТП3-цех 8	60	117,8	170,3	1	медь	1	1	254	233,7	-	70	2,4
ТП3-цех 9	23	37	52,2	1	алюминий	1	1,09	80	82,3	-	25	0,6
ТП4-цех 6	21	56	80,5	1	алюминий	1	1	114	103,8	-	35	0,8
ТП6-цех 14	81	358	516,5	1	медь	1	1,09	593	648,5	-	185	4,7
ТП6-цех 13	72	17,7	25,4	1	алюминий	1	1	35	31,3	-	4	1
ТП7-цех 10	55	271,7	391,7	1	медь	1	1,09	522	568	-	150	3
ТП7-цех 5	15	99,5	72	2	алюминий	0,9	1	196	162	143	95	0,06
ТП7-цех 7	130	156,4	113,4	2	алюминий	0,9	1	285	235,8	225	185	1,7

14 Расчет токов короткого замыкания

Расчеты ТКЗ производятся для точек короткого замыкания, указанных на схеме на рисунке 14.1.

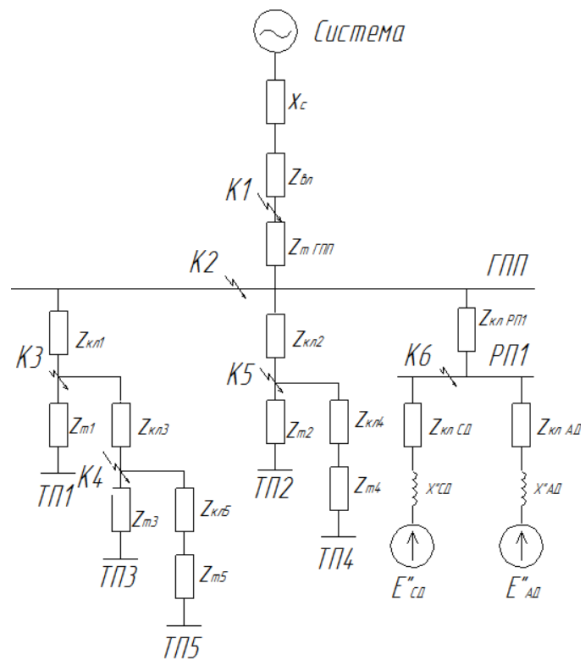


Рисунок 14.1 - Расчетная схема

Расчет тока короткого замыкания для точки К1.

Мощность системы: $S_H = 900$ МВА,

На стороне 110 кВ реактивное сопротивление системы, отнесенное к мощности системы: $x_H^* = 0,3$.

$$x_c = x_H^* \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \quad (14.1)$$

$$x_c^{110} = 0,3 \cdot \frac{(115 \cdot 10^3)^2}{900 \cdot 10^6} = 4,41 \text{ Ом};$$

$$x_L = x_0 \cdot L, \quad (14.2)$$

$$r_{л} = r_0 \cdot L, \quad (14.3)$$

где L – длина воздушной линии 5,2 км;

r_0 и x_0 – удельные сопротивления линии (соответственно 0,249 Ом/км и 0,423 Ом/км).

$$x_{л}^{110} = 0,423 \cdot 5,2 = 2,2 \text{ Ом};$$

$$r_{л}^{110} = 0,249 \cdot 5,2 = 1,3 \text{ Ом};$$

Определяется сверхпереходный ток короткого замыкания:

$$I_{к1}^{(3)} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(x^{110} + x_c)^2 + (r^{110})^2}} \quad (14.4)$$

где U_n – напряжение до короткого замыкания;

$x^{110} + x_c$ – сумма реактивных сопротивлений элементов от системы до точки короткого замыкания;

r^{110} – активное сопротивление всех элементов до точки КЗ.

$$I_{к1}^{(3)} = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(2,2 + 4,41)^2 + (1,3)^2}} = 9,86 \text{ кА}$$

Определяется постоянная времени цепи короткого замыкания по формуле:

$$T_A = \frac{x_{\Sigma к1}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot r_{\Sigma к1}} \quad (14.5)$$

где f – частота сети, Гц.

$$T_A = \frac{2,2 + 4,41}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,3} = 0,016 \text{ с}$$

Определяется сдвиг по фазе напряжения источника по формуле:

$$\alpha = \arctg \frac{x_{\Sigma k1}}{r_{\Sigma k1}} \quad (14.6)$$

$$\alpha = \arctg \frac{2,2 + 4,41}{1,3} = 1,37 \text{ рад}$$

Ударный коэффициент равен:

$$K_{y\partial} = 1 + e^{(-0,01 \cdot \frac{(0,5 + \frac{\alpha}{\pi})}{T_A})} \quad (14.7)$$

$$K_{y\partial} = 1 + e^{(-0,01 \cdot \frac{(0,5 + \frac{1,454}{\pi})}{0,016})} = 1,37$$

Ударный ток короткого замыкания определяется по формуле:

$$i_{y\partial} = \sqrt{2} \cdot K_{y\partial} \cdot I'_{n0} + I_{n.ном} \quad (14.8)$$

где $I_{n.ном}$ – номинальный ток, кА;

I'_{n0} – суммарный ток кз, кА.

Для точки короткого замыкания не учитывается ток подпитки высоковольтных двигателей, так как электродвигатели подключены к месту короткого замыкания через ступень трансформации, соответственно, двигатели удалены от точки короткого замыкания.

$$I'_{п0} = I_{к1}^{(3)}$$

$$i_{удк1} = \sqrt{2} \cdot 1,37 \cdot 9,86 + 0 = 21,58 \text{ кА.}$$

Расчет тока короткого замыкания для точки К2.

Трансформатор ГПП – ТДН-16000.

Паспортные данные: $S_{нт} = 16 \text{ МВА}$; $U_k = 10,5\%$; $\Delta P_{кз} = 85 \text{ кВт}$.

Сопротивления трансформаторов определяется по формулам:

$$x_T = \frac{U_k \% \cdot U_H^2}{100 \cdot S_{Hm}} \quad (14.9)$$

$$r_T = \frac{\Delta P_{кз} \cdot U_H^2}{S_{Hm}} \quad (14.10)$$

Коэффициент приведения к 10 кВ:

$$K_{np} = \left(\frac{U_{Hn}}{U_{вн}}\right)^2 = \left(\frac{11000}{115000}\right)^2 = 0,009$$

Сопротивления трансформатора, приведенное к 10 кВ:

$$r_T = \frac{85 \cdot 10^3 (11 \cdot 10^3)^2}{(16 \cdot 10^6)^2} = 0,04 \text{ Ом}$$

$$x_T = \frac{10,5 \cdot (11 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 16 \cdot 10^6} = 0,794 \text{ Ом}$$

Суммарные сопротивления равны:

$$r_{\Sigma} = r^{110} \cdot K_{np} + r_T = 0,647 \cdot 0,009 + 0,04 = 0,0459 \text{ Ом};$$

$$x_{\Sigma} = x_c \cdot K_{np} + x^{110} \cdot K_{np} + x_T = 4,41 \cdot 0,009 + 1,1 \cdot 0,009 + 0,794 = 0,844 \text{ Ом}$$

Сверхпереходной ток кз в точке К2 равен:

$$I_{к2}^{(3)} = \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(x_{\Sigma})^2 + (r_{\Sigma})^2}} = \frac{11}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(0,844)^2 + (0,0459)^2}} = 7,522 \text{ кА}$$

Расчет тока короткого замыкания для точки К6.

$$r_{кЛ6} = 0,118 \cdot 0,22 = 0,026 \text{ Ом};$$

$$x_{кЛ6} = 0,104 \cdot 0,22 = 0,023 \text{ Ом}.$$

$$x_{\Sigma 6} = x_{\Sigma} + x_6 = 0,844 + 0,023 = 0,87$$

$$r_{\Sigma 6} = r_{\Sigma} + r_6 = 0,0459 + 0,026 = 0,072$$

$$I_{к6}^{(3)} = \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(x_{\Sigma 6})^2 + (r_{\Sigma 6})^2}} = \frac{11}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(0,87)^2 + (0,072)^2}} = 7,3$$

Влияние двигателей есть на токи короткого замыкания.

Установленные двигатели:

- два синхронных двигателя марки СДК2-19-39-16 УХЛ4 мощностью 2000 кВт, $\cos\varphi = 0,9$; $\operatorname{tg}\varphi = -0,48$, $\eta = 95,8\%$, ЭДС $E'' = 1,1$ и сверхпереходное индуктивное сопротивление равно $x''_d = 0,2$;

- два асинхронных двигателя марки АОД-1250-4 У1 мощностью 1250 кВт, $\cos\varphi = 0,88$; $\operatorname{tg}\varphi = 0,75$, $\eta = 93,5\%$, ЭДС $E'' = 0,9$ и сверхпереходное индуктивное сопротивление равно $x''_d = 0,2$;

Длина подключающих кабелей менее 300 метров, поэтому их сопротивления при расчете тока подпитки не учитываются.

Определяется номинальный ток электродвигателя по формуле:

$$I_{ном} = \frac{1000 \cdot P_n}{U_n \cdot \cos\varphi \cdot \sqrt{3}} \quad (14.11)$$

где U_n – номинальное базисное напряжение веха двигателя, В;

$\cos\varphi$ – коэффициент мощности двигателя;

P_n – номинальная мощность двигателя, кВт.

$$I_{номСД} = \frac{1000 \cdot 2000}{10000 \cdot 0,9 \cdot \sqrt{3}} = 128,3 \text{ A}$$

$$I_{номАД} = \frac{1000 \cdot 1250}{10000 \cdot 0,8 \cdot \sqrt{3}} = 90,21 \text{ A}$$

Определяется действующее начальное значение периодической составляющей тока кз синхронного двигателя:

$$I_{ноСД} = \frac{E'' \cdot I_{номСД}}{x''_d} \quad (14.12)$$

$$I_{ноСД} = \frac{1,1 \cdot 128,3}{0,2} = 705,65 \text{ A}$$

Определяется значение сверхпереходного индуктивного сопротивления по формуле:

$$x''_{AD} = \frac{1}{K_{II}} \frac{U_{ном}^2 \cdot \cos \varphi \cdot \eta}{P_{ном}} \quad (14.13)$$

где K_{II} – кратность пускового тока, равная 6,5.

$$x''_{AD} = \frac{1}{6,5} \cdot \frac{10^2 \cdot 0,88 \cdot 0,935}{1,25} = 10,13 \text{ Ом}$$

Сверхпереходная ЭДС:

$$E''_{AD} = \sqrt{(U + I_{номAD} \cdot x''_{AD} \cdot \sin \varphi)^2 + (I_{номAD} \cdot x''_{AD} \cdot \cos \varphi)^2} \quad (14.14)$$

$$E''_{AD} = \sqrt{(10000 + 90,21 \cdot 10,13 \cdot 0,47)^2 + (90,21 \cdot 10,13 \cdot 0,88)^2} = 10865,3 \text{ В}$$

$$I_{ноAD} = \frac{E''_{AD}}{x''_{AD}} \quad (14.15)$$

$$I_{ноAD} = \frac{10865,3}{10,13} = 1072,6 \text{ А}$$

Действующее начальное значение периодической составляющей тока кз в точке К6 рассчитывается по формуле:

$$I_{по} = I_{по} + I_{поСД} + I_{поAD} \quad (14.16)$$

где $I_{но}$ - начальное действующее значение периодической составляющей тока кз от питающей системы.

$$I_{но} = 7,3 + 0,7 + 1,072 = 9,622 \text{ кА}$$

Определяется полное мгновенное значение тока кз в месте замыкания от питающей системы и электродвигателей:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot K_{уд} \cdot I_{номСД} + 6,5 \cdot I_{ноМАД}, \quad (14.17)$$

$$i_{уд} = 1,77\sqrt{2} \cdot 7,3 + 6,5 \cdot 0,128 + 6,5 \cdot 0,09 = 20,65 \text{ кА}$$

Определяется тепловой импульс тока короткого замыкания:

$$B_{\kappa} = I_{n0}^2 \cdot t_{\kappa\text{З}} \quad (14.18)$$

где $t_{\kappa\text{З}}$ - время, когда протекает ток короткого замыкания, с.

Время протекания тока короткого замыкания определяется:

$$t_{\kappa\text{З}} = t_{\text{с.в.}} + t_{\text{рз}} + T_{\alpha} + n \cdot \Delta t; \quad (14.19)$$

где $t_{\text{с.в.}}$ – время срабатывания самого выключателя (0,03 с), с;

$t_{\text{рз}}$ – время срабатывания реле (0,06 с), с;

Δt - ступень селективности, с.

Точка К2:

$$t_{\kappa\text{З}} = 0,03 + 0,06 + 0,057 + 3 \cdot 0,3 = 0,1 \text{ с};$$

$$B_{\kappa} = 7,79^2 \cdot 0,1 = 8,96 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

Таблица 14.1 - Результаты расчета токов трехфазного КЗ

Точка КЗ	$x_{\Sigma\kappa}$, МОм	$r_{\Sigma\kappa}$, МОм	α , рад	$k_{уд}$	$I_{n0}^{(3)}$, кА	$i_{уд}^{(3)}$, кА	$t_{\kappa\text{З}}$, с	B_{κ} , кА ² ·с
1	6,6	1,3	1,37	1,6	9,87	21,58	-	-
2	0,05	0,84	1,4	1,7	7,8	19,38	0,1	8,9
3	0,85	0,11	1,5	1,65	7,42	17,6	0,2	6,5
4	0,88	0,18	1,47	1,5	7,23	15,2	0,12	5,56
5	0,88	0,12	1,42	1,74	7,4	17,7	0,14	6,3
6	0,87	0,07	1,45	1,81	9,6	20,65	0,4	21,7

15 Выбор и проверка оборудования на стороне 10 кВ

15.1 Выбор КРУ

Ячейки КРУ внутренней установки размещаются в ЗРУ, применяемых на напряжение 10 кВ. К установке принимается КРУ серии КВ-1, в таблице 15.1 приведены его технические характеристики.

Таблица 15.1 – Технические характеристики КРУ

Название	Значение
Номинальное напряжение, кВ	10
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	12
Номинальный ток сборных шин	1000, 1600, 2000, 3200
Вакуумный выключатель и его номинальный ток отключения, А	ВВ-10; 20
Трансформатор напряжения	НАМИ
Трансформатор тока	ТПОЛ-10
Ток термической стойкости, кА	20
Время протекания тока термической стойкости, с	1
Номинальный ток электродинамической стойкости, кА	52

15.2 Выбор выключателя ячейки ввода

К установке принимается выключатель типа ВВ-10 с пружинным приводом, который устанавливается в ячейке ввода - ВВ-М-10-20/630 УЗ.

Таблица 15.2 – Выключатель ячейки ввода

Исходные данные	Расчетные данные
$I_n = 630 \text{ А}$	$I_n = 422 \text{ А}$
$i_y = 52 \text{ кА}$	$i_y = 20,65 \text{ кА}$
$I_{пр,с} = 20 \text{ кА}$	$I''_0 = 7,3 \text{ кА}$
$I_n^2 \cdot t = 20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_k = 38,64 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

15.3 Выбор выключателя ячейки секционирования

Таблица 15.3 – Выключатель ячейки секционирования

Исходные данные	Расчетные данные
$I_H = 630 \text{ А}$	$I_H = 211 \text{ А}$
$i_y = 52 \text{ кА}$	$i_y = 20,65 \text{ кА}$
$I_{pp,c} = 20 \text{ кА}$	$I''_0 = 7,3 \text{ кА}$
$I_{it}^2 \cdot t = 20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_k = 22,7 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

15.4 Выбор выключателя ячеек отходящих линий

Таблица 15.4 – Выключатель ячеек отходящих линий

Исходные данные	Расчетные данные
$I_H = 630 \text{ А}$	$I_H = 70,33 \text{ А}$
$i_y = 52 \text{ кА}$	$i_y = 20,65 \text{ кА}$
$I_{pp,c} = 20 \text{ кА}$	$I''_0 = 7,3 \text{ кА}$
$I_{it}^2 \cdot t = 20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_k = 6,8 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

15.5 Выбор выключателей нагрузки

Таблица 15.5 - Выбор выключателей нагрузки

Номер ТП	$I_p, \text{ А}$	$I_{H,отк}, \text{ А}$	$i_{уд}, \text{ кА}$	$B_k, \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	Марка
1	29	630	51	17,7	ВНА-СЭЦ 10 кВ
2	22,14			17,258	
3	29,2			15,76	
4	19,85			17,258	
5	27,79			15,76	

16 Выбор главной схемы электрических соединений

Схема электрических соединений принимается 4Н - два блока с выключателями и со стороны линии с неавтоматической перемычкой.

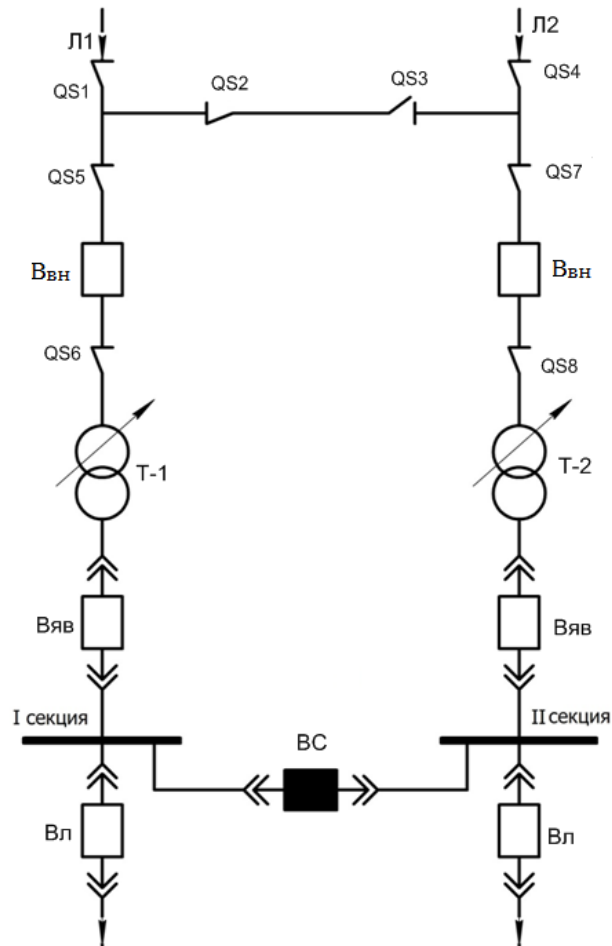


Рисунок 16.1 – Упрощенная принципиальная схема ПС

16.1 Определение теплового импульса

Таблица 16.1 – Определение теплового импульса

Название ячейки	$t_{кз}, c$	I'', kA	$B_K, kA^2 \cdot c$
Отходящая линия	0,2	5,6	6
Секционный выключатель	0,5	5,6	16
Ввод	0,8	5,6	26
Сторона ВН	1,1	1,5	3

17 Выбор оборудования на высокой стороне подстанции

17.1 Выбор и проверка проводников питающей линии

На открытых распределительных устройствах напряжением 110 кВ и выше ошиновка производится гибкой. Гибкие шины имеют небольшое удельное сопротивление и лучшую механическую прочность, выполняются предпочтительно проводами марки АС.

Принимается провод АС-120. Характеристики провода в таблице 17.1.

Таблица 17.1 – Характеристика провода АС–120

Радиус провода r_0 , мм	Длительно допустимый $I_{дл.доп}$, А
15,2	380

17.2 Выбор изоляторов

«Для крепления гибких проводов на ОРУ обычно используются подвесные изоляторы. Принимаются к установке полимерные подвесные изоляторы марки ЛК70/110-III УХЛ1.

Так как расстояния между фазами выполняются большими, на механическую прочность изоляторы не нуждаются в проверке» [9].

17.3 Выбор высокочастотного заградителя

Выбирается высокочастотный заградитель типа ВЗ-630-0,5У1.

Таблица 17.2 – Высокочастотный заградитель

Условие выбора/проверки	Данные ВЗ-630-0,5У1	Расчетные данные
$U_{ном} \geq U_{уст}$	$U_{ном} = 110$	$U_{уст} = 110$
$I_{ном} \geq I_{расч}$	$I_{ном} = 630$	$I_{расч} = 81,92$
$B_K \leq I_{тер}^2 t_{тер}$	$I_{тер}^2 t_{тер} = 1681 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_K = 2,9$
$i_{уд} \leq i_{дин}$	$i_{дин} = 16$	$i_{уд} = 4,22$

17.4 Выбор ограничителя перенапряжений

Функция ограничителей перенапряжения заключается в защите оборудования подстанции от грозовых перенапряжений. Технические характеристики ОПН-110 У1 приведены в таблице 17.3.

Таблица 17.3 — Табличные данные ограничителя перенапряжения

Параметр	Значение
Наименование аппарата	ОПН-110 У1
Номинальное напряжение,	110
Наибольшее рабочее перенапряжение, кВ	73
Расчетный ток коммутационного перенапряжения, А	280
Остающееся напряжение при расчетном токе, кВ, не более	180
Остающееся напряжение, кВ	
3000А	230
5000А	250
10000А	280

17.5 Выбор разъединителей

К установке принимается разъединитель марки РДЗ-110/1000 УХЛ1 с двигательным приводом ПДН-1У1.

Таблица 17.4 – Разъединитель

Условия	Исходные данные РДЗ-110	Расчетные данные
$U_{ном} \geq U_{уст}$	$U_{ном} = 110 \text{ кВ}$	$U_{уст} = 110 \text{ кВ}$
$I_{ном} \geq I_{расч}$	$I_{ном} = 1000 \text{ А}$	$I_{расч} = 81,92 \text{ А}$
$i_{дин} \geq i_{уд}$	$i_{дин} = 80 \text{ кА}$	$i_{уд} = 4,22 \text{ кА}$
$I_{мер}^2 \cdot t_{мер} \geq B_k$	$I_{мер}^2 \cdot t_{мер} = 31,5^2 \cdot 3 = 2977 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_k = 2,9 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

17.6 Выбор и проверка высоковольтного выключателя

Выбирается выключатель марки ВГУ-110 элегазовый, пружинный привод.

Таблица 17.5 – Высоковольтный выключатель

Условия	Исходные данные ВГУ-110	Расчетные данные
$U_{ном} \geq U_{уст}$	$U_{ном} = 110 \text{ кВ}$	$U_{уст} = 110 \text{ кВ}$
$I_{ном} \geq I_{расч}$	$I_{ном} = 2000 \text{ А}$	$I_{расч} = 81,92 \text{ А}$
$i_{дин} \geq i_{уд}$	$i_{дин} = 102 \text{ кА}$	$i_{уд} = 4,22 \text{ кА}$
$I_{тер}^2 \cdot t_{тер} \geq B_{к}$	$I_{тер}^2 \cdot t_{тер} = 40^2 \cdot 2 = 3200 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{к} = 2,9 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$
$I_{отк} \geq I''$	$I_{отк} = 40 \text{ кА}$	$I'' = 1,65 \text{ кА}$

17.7 Выбор измерительных трансформаторов тока

17.7.1 Выбор и проверка ТТ встроенного в силовые трансформаторы

Для установки у силового трансформатора принимаются встроенные трансформаторы типа ТФЗМ 110Б-І. Результаты расчетов по выбору и проверке трансформатора тока указаны в таблице 17.6.

Таблица 17.6 – Трансформатор тока ТФЗМ 110Б-І

Условия	Данные трансформатора тока	Расчетные данные
$U_{ном} \geq U_{уст}$	$U=110 \text{ кВ}$	$U=110 \text{ кВ}$
$I_{ном} \geq I_{расч}$	$I_{ном}=100 \text{ А}$	$I_{ав}=81,92 \text{ А}$
$i_{дин} \geq i_{уд}$	$i_{дин} = 20 \text{ кА}$	$i_{у} = 4,22 \text{ кА}$
$I_{тер}^2 t_{тер} \geq B_{к}$	$I_{тер}^2 \cdot t_{тер} = 4^2 \cdot 3 = 48 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{к} = 2,9 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

17.7.2 Выбор и проверка ТТ в цепи силовых выключателей

В цепи выключателя для установки принимаются трансформаторы тока типа ТГФМ-110, с $I_{1ном} = 200 \text{ А}$.

Таблица 17.7 – Трансформатор тока ТГФМ-110

Условия	Данные трансформатора тока	Расчетные данные
$U_{ном} \geq U_{уст}$	$U=110 \text{ кВ}$	$U=110 \text{ кВ}$
$I_{ном} \geq I_{расч}$	$I_{ном}=200 \text{ А}$	$I=81,92 \text{ А}$
$i_{дин} \geq i_{уд}$	$i_{дин} = 80 \text{ кА}$	$i_{у} = 4,22 \text{ кА}$
$I_{тер}^2 t_{тер} \geq B_{к}$	$I_{тер}^2 \cdot t_{тер} = 992,25 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{к} = 2,9 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

17.8 Выбор и проверка аппаратов в нуле трансформатора

В установках 110 кВ в нейтрали трансформатора предусматривается установка заземлителя нейтрали ЗОН.

К установке принимается ЗОН-110М-ІУ с типом привода ПРН-11.

Таблица 17.8 – Заземлитель ЗОН-110М-І У

Условия	Исходные данные ЗОН-110М-ІУ	Расчетные данные
$U_{ном} \geq U_{уст}$	$U_{ном} = 110 \text{ кВ}$	$U_{уст} = 110 \text{ кВ}$
$I_{ном} \geq I_{расч}$	$I_{ном} = 400 \text{ А}$	$I_{расч} = 81,92 \text{ А}$
$i_{дин} \geq i_{уд}$	$i_{дин} = 16 \text{ кА}$	$i_y = 4,22 \text{ кА}$
$I_{тер}^2 t_{тер} \geq B_K$	$I_{тер}^2 \cdot t_{тер} = 6,3^2 \cdot 3 = 119,07 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_K = 2,9 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

Для защиты нейтрали от атмосферных и коммутационных перенапряжений в нейтрали трансформатора также устанавливается ограничитель перенапряжений. Выбираются ограничители перенапряжений на то же напряжение, котором выполнена изоляция нейтрали трансформатора.

К установке принимается ОПН-110 У1.

Таблица 17.9 - Ограничитель перенапряжения

Название аппарата	U _н , кВ	Наибольшее рабочее перенапряжение, кВ	U _{ос т} , кВ	Расчетный ток коммутационного перенапряжения, А
ОПН-110 У1	110	73	180	280

18 Выбор и проверка аппаратов на стороне низкого напряжения

18.1 Выбор и проверка шинного моста

В качестве шинного моста к установке применяются алюминиевые шины прямоугольного сечения - шины сечением $F = 297 \text{ мм}^2 (6 \times 50 \text{ мм})$. Для увеличения механической прочности располагаются они плашмя.

Таблица 18.1 – Алюминиевая шина

Размеры, мм		Площадь поперечного сечения S , мм ²	Длительно допустимый $I_{\text{дл.доп}}$, А
b	h		
6	50	297	740

18.2 Выбор и проверка опорных изоляторов

Выбираются опорные стержневые изоляторы типа С4-80-I УХЛ, $F_{\text{разр}} = 4000 \text{ Н}$, высота изолятора равна 190 мм.

18.3 Выбор проверка проходных изоляторов

К установке принимается проходной изолятор ИП-10/630-750 УХЛ2, номинальный ток которого равен 630 А, а разрушающее усилие 750 Н.

18.4 Выбор и проверка сборных шин

К установке принимаются шины сечением $F = 357 \text{ мм}^2 (6 \times 60 \text{ мм})$, $I_{\text{дл.доп.ном}} = 870 \text{ А}$ [8].

Условию проверки на термическую стойкость выбранные шины удовлетворяют.

18.5 Выбор ячеек ввода, ячейки секционного выключателя и ячейки отходящей линии

К установке принимается комплектное распределительное устройство марки К-63.

Таблица 18.2–Технические характеристики выкатного исполнения серии К-63

Параметр	Номинальные данные
Номинальное напряжение, кВ	10
Номинальный ток сборных шин, А	1000, 1600, 2000, 3150
Номинальный ток выключателя, А	630 – 1600
Номинальный ток отключения вакуумного выключателя, кА	12,5, 20, 31,5
Трёхсекундный ток термической стойкости, кА	12,5, 20, 31,5
Ток электродинамической стойкости, кА	51, 81
Тип вакуумного выключателя	ВБЭМ, ВБПС, ВВЭ-М, ВБКЭ, ВБТЭ, ВВ\TEL, ЭВОЛИС
Тип трансформатора тока	ТЛК-10 30/5 –1500/5
Тип трансформатора тока нулевой последовательности	ТДЛЗ-0,66
Тип трансформатора напряжения	НАМИТ, ЗНОЛ.06, НОЛ.08
Тип трансформатора собственных нужд	ТСКС, ОЛС

18.6 Выбор и проверка выключателей КРУ

К установке всех ячейках принимается выключатель типа ВВ/ TEL [4].

18.6.1 Выбор и проверка выключателей ячейки ввода

Таблица 18.3 – Выключатель ячейки ввода ВВ/ TEL-10-20/1000

Условия	Исходные данные ВВ/TEL-10-20/1000	Расчетные данные
$U_{ном} \geq U_{уст}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$	$U_{уст} = 10 \text{ кВ}$
$I_{ном} \geq I_{расч}$	$I_{ном} = 1000 \text{ А}$	$I_{расч} = 487,4 \text{ А}$
$i_{дин} \geq i_{уд}$	$i_{дин} = 52 \text{ кА}$	$i_{уд} = 14,7 \text{ кА}$
$I_{мер}^2 \cdot t_{мер} \geq B_{к}$	$I_{мер}^2 \cdot t_{мер} = 20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{к} = 25,7 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$
$I_{отк} \geq I''$	$I_{отк} = 20 \text{ кА}$	$I'' = 5,77 \text{ кА}$

18.6.2 Выбор и проверка секционного выключателя

Таблица 18.4 - Секционный выключатель ВВ/ TEL-10-20/630

Условия	Исходные данные ВВ/TEL-10-20/630	Расчетные данные
$U_{ном} \geq U_{уст}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$	$U_{уст} = 10 \text{ кВ}$
$I_{ном} \geq I_{расч}$	$I_{ном} = 630 \text{ А}$	$I_{расч} = 243,7 \text{ А}$
$i_{дин} \geq i_{уд}$	$i_{дин} = 32 \text{ кА}$	$i_{уд} = 14,7 \text{ кА}$
$I_{тер}^2 \cdot t_{тер} \geq B_{\kappa}$	$I_{тер}^2 \cdot t_{тер} = 12,5^2 \cdot 3 = 468 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{\kappa} = 15,7 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$
$I_{отк} \geq I''$	$I_{отк} = 12,5 \text{ кА}$	$I'' = 5,77 \text{ кА}$

18.6.3 Выбор и проверка выключателя ячейки отходящей линии

Таблица 18.5 - Выключатель ячейки отходящей линии ВВ/ TEL-10-20/630

Условия	Исходные данные ВВ/TEL-10-20/630	Расчетные данные
$U_{ном} \geq U_{уст}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$	$U_{уст} = 10 \text{ кВ}$
$I_{ном} \geq I_{расч}$	$I_{ном} = 630 \text{ А}$	$I_{расч} = 121,8 \text{ А}$
$i_{дин} \geq i_{уд}$	$i_{дин} = 32 \text{ кА}$	$i_{уд} = 14,7 \text{ кА}$
$I_{тер}^2 \cdot t_{тер} \geq B_{\kappa}$	$I_{тер}^2 \cdot t_{тер} = 12,5^2 \cdot 3 = 468 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{\kappa} = 5,67 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$
$I_{отк} \geq I''$	$I_{отк} = 12,5 \text{ кА}$	$I'' = 5,77 \text{ кА}$

Условиям выбора и проверки выключатель ВВ/ TEL-10-20/630 удовлетворяет.

18.7 Выбор и проверка трансформаторов тока: ячейки ввода, ячейки секционного выключателя и отходящей линии

18.7.1 Выбор и проверка трансформатора тока ячейки ввода

К установке в ячейке ввода принимается ТТ типа ТЛК-10 1000/5.

Проверка выбранного ТЛК-10 1000/5 выполняется по электротермической, динамической стойкости, а также по величине вторичной нагрузки. Результаты в таблице 18.6.

Таблица 18.6 – Выбор и проверка ТТ типа ТЛК-10 1000/5

Условия	Исходные данные ТЛК-10 1000/5	Расчетные данные
$U_{ном} \geq U_{уст}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$	$U_{уст} = 10 \text{ кВ}$
$I_{ном} \geq I_{расч}$	$I_{ном} = 1000 \text{ А}$	$I_{расч} = 487,4 \text{ А}$
$i_{дин} \geq i_{уд}$	$i_{дин} = 81 \text{ кА}$	$i_{уд} = 14,7 \text{ кА}$
$I_{мер}^2 \cdot t_{мер} \geq B_{к}$	$I_{мер}^2 \cdot t_{мер} = 31,5^2 \cdot 3 = 2977 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{к} = 25,7 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$
$r_{2н} \geq r_2$	$r_{2н} = 0,4 \text{ Ом}$	$r_2 = 0,244 \text{ Ом}$

Результаты выбора электроизмерительных щитковых приборов для ТТ ячейки ввода указаны в таблице 18.7.

Таблица 18.7 – Приборы

Название	Класс точности	Тип	Нагрузка, ВА	
			А	С
Амперметр	1,5	ЭЗ	0,1	0,1
Счетчик реактивно-активной мощности «Альфа А-1800»	0,2	А	2	2
Итого			2,1	2,1

18.7.2 Выбор и проверка трансформатора тока ячейки секционного выключателя

К установке в ячейке секционного выключателя принимается ТТ типа ТЛК-10 600/5.

Результаты проверки приведены в таблице 18.8.

Таблица 18.8 – Выбор и проверка ТТ типа ТЛК-10 600/5

Условия	Исходные данные ТЛК-10 600/5	Расчетные данные
$U_{ном} \geq U_{уст}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$	$U_{уст} = 10 \text{ кВ}$
$I_{ном} \geq I_{расч}$	$I_{ном} = 600 \text{ А}$	$I_{расч} = 243,7 \text{ А}$
$i_{дин} \geq i_{уд}$	$i_{дин} = 81 \text{ кА}$	$i_{уд} = 14,7 \text{ кА}$
$I_{мер}^2 \cdot t_{мер} \geq B_{к}$	$I_{мер}^2 \cdot t_{мер} = 31,5^2 \cdot 3 = 2977 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{к} = 15,7 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$
$r_{2н} \geq r_2$	$r_{2н} = 0,4 \text{ Ом}$	$r_2 = 0,164 \text{ Ом}$

Результаты выбора электроизмерительных щитковых приборов для ТТ ячейки секционного выключателя указаны в таблице 18.9.

Таблица 18.9 – Приборы

Название	Класс точности	Тип	Нагрузка, ВА	
			фаза А	фаза С
Амперметр	1,5	ЭЗ	0,1	0,1
Итого:			0,1	0,1

18.7.3 Выбор и проверка ТТ ячейки отходящих линий

В ячейке отходящих линий к установке принимается ТЛК-10 600/5.

Таблица 18.10 – Выбор и проверка ТТ типа ТЛК-10 600/5

Условия	Исходные данные ТЛК-10 600/5	Расчетные данные
$U_{ном} \geq U_{уст}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$	$U_{уст} = 10 \text{ кВ}$
$I_{ном} \geq I_{расч}$	$I_{ном} = 600 \text{ А}$	$I_{расч} = 121,8 \text{ А}$
$i_{дин} \geq i_{уд}$	$i_{дин} = 81 \text{ кА}$	$i_{уд} = 14,7 \text{ кА}$
$I_{мер}^2 \cdot t_{мер} \geq B_{к}$	$I_{мер}^2 \cdot t_{мер} = 31,5^2 \cdot 3 = 2977 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{к} = 5,67 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$
$r_{2н} \geq r_2$	$r_{2н} = 0,4 \text{ Ом}$	$r_2 = 0,244 \text{ Ом}$

Результаты выбора электроизмерительных щитковых приборов для ТТ ячейки отходящих линий указаны в таблице 18.11.

Таблица 18.11 – Приборы

Название	Класс точности	Тип	Нагрузка, ВА	
			фаза А	фаза С
Амперметр	1,5	ЭЗ	0,1	0,1
Счетчик мощности «Альфа А1800»	0.2	А	2	2
Итого:			2,1	2,1

18.8 Выбор кабельной линии

Выбирается кабель марки АПвП 1х120/16-10 с изоляцией из сшитого полиэтилена сечением 120 мм², веха длительно этап допустимый ток виток которого маяк равен 228 А.

18.9 Выбор трансформатора напряжения

К установке принимается трансформатор напряжения типа НАМИТ-10-2 УХЛ2.

Таблица 18.12 – Параметры НАМИТ-10-2 УХЛ2

Характеристика	Значение
Номинальное напряжение $U_{ВН}$, кВ	10
Номинальная вторичная нагрузка $S_{2Н}$, ВА	200
Класс точности	0,5
$U_{НН1}$, В	100
$U_{НН2}$, В	$100/\sqrt{3}$

Таблица 18.13 – Подключенные приборы

Название	n	Р, Вт	Число катушек n_k	cosφ	sinφ	Тип	Нагрузка	
							Р, Вт	Q, ВАр
Вольтметр	4	2	1	1	–	Э377	8	–
Счетчик	6	2	2	0,38	0,925	А	24	58,42
Итого	9						32	58,42

18.10 Выбор предохранителей для защиты трансформатора напряжения

Для защиты трансформаторов напряжения к установке принимается предохранитель ПКН-001-10 У3 с номинальным напряжением 10 кВ.

19 Релейная защита

Релейная защита – совокупность множества устройств, предназначенных для скорейшего автоматического выявления повреждений и отделения от общей электроэнергетической системы поврежденного участка этой системы в аварийных случаях с целью бесперебойной работы энергосистемы и сохранности довольно дорогостоящего оборудования. При возникновении повреждений устройства защиты должны выявить поврежденный участок и отключить его от общей системы, воздействуя на специальные выключатели, необходимые размыкания элементов в момент короткого замыкания [14].

Нормальная работа энергосистем невозможна без устройств релейной защиты. Основные требования, предъявляемые к таким установкам: селективность, надежность, быстродействие, чувствительность.

В данном разделе учтены защиты:

- а) Кабельной линии ГПП-ТП2-ТП4;
- б) Высоковольтного электродвигателя СД 2000 кВт;
- в) Защита трансформатора ГПП;
- г) АВР на секционном выключателе РУ ГПП;

При проектировании релейной защиты были использованы:

- а) Трансформаторы тока ТФЗМ-110 200/5, ТЛК-10 1000/5, ТЛК-10 600/5;
- б) Трансформаторы напряжения: НАМИТ-10-2;
- в) Реле дифференциальные: РСТ-15;
- г) Реле промежуточные: РП25;
- д) Реле указательное: РУ-21;
- е) Реле газовое: РГТ-80 УХЛ 1;
- ж) Реле тока: РС80М, РТЗ-51;
- з) Реле времени: РСВ260, РСВ-01-3;
- и) Реле АВР: РС80 АВР;
- к) Светосигнальная арматура: ENR-22;

л) Звуковая сигнализация: ТХ-6831;

м) Микропроцессорный терминал SPAC-810С, SPAC-810Д.

Таблица 19.1 – Карта уставок

Тип защиты	Наименование уставки	Значение уставки
Защита КЛ		
Двухступенчатая защита к.з. КЛ	$I_{сз}^{II}/I_{ср}^{II}$	400/10А
	$t_{сз}^{II}$	0,51 с
Защита от ЗНЗ КЛ	$I_{с.з}/I_{с.р}$	0,625/0,025 А
Защита трансформатора		
Дифференциальная защита трансформатора	$I_{сз}/I_{с.р}^*$	288,68 А / 1
	$W_{осн}$	12
	$W_{неосн}$	13
Защита двигателя		
Защита к.з. двигателя	$I_{с.з}^I/I_{с.р}^I$	833,95 / 42,5 А
Защита от перегрузки дви- гателя	$I_{с.з}^{II}/I_{с.р}^{II}$	171,07 / 8,6 А
	$t_{сз}^{II}$	14 с
Защита от ЗНЗ	$I_{с.з}/I_{с.р}$	0,5/0,02 А
Защита от понижения <small>озон</small> напряжения	$U_{сз}^I/U_{с.р}^I$	7/0,07 кВ
	$t_{сз}^I$	1 с
	$U_{сз}^{II}/U_{с.р}^I$	5/0,05 кВ
	$t_{сз}^{II}$	10 с
Защита от асинхронного в- хода	$I_{с.з}/I_{с.р}$	166,79/5,56 А
	$t_{выдержки}$	1,8 с
АВР		
АВР на секционном вы- ключателе РУ	$U_{с.1}$	40 В
	$t_{АВР 1}$	1,6 с
	$U_{с.2}$	70 В
	$t_{АВР2}$	0,6 с

20 Расчет заземления грозозащиты подстанции

20.1 Расчет заземляющих устройств

Применяются заземлители в виде уголков, длина которых равна 2,5 м, размер – 60х60х6 мм. Горизонтальные соединения выполняются стальными круглыми прутками с диаметром 8 мм. Грунт местности – супесь с удельным сопротивлением равным 300 Ом · м, климатическая зона города Оренбург III.

Сопротивление растекания одиночного заземлителя определяется по формуле [13]:

$$R_{од} = 0,298 \cdot \rho \cdot K_M, \quad (20.1)$$

где K_M – коэффициент, который зависит от климатической зоны (для III = 1,6).

$$R_{од} = 0,298 \cdot 300 \cdot 1,6 = 14,3 \text{ Ом.}$$

Определяется количество заземлителей без учета соединительных полос по формуле:

$$n = \frac{R_{од}}{R_з \cdot \eta}; \quad (20.2)$$

где $R_з$ – сопротивление заземляющего устройства равное 0,5 Ом;
 η_B – коэффициент использования вертикальных заземлителей равен 0,4.

$$n = \frac{14,3}{0,5 \cdot 0,4} = 66,5.$$

Определяется максимальное число заземлителей:

$$n_{max} = \frac{L}{l}; \quad (20.3)$$

где $L = 2 \cdot ((a + 6) + (b + 6))$ – периметр с учетом заземления, м;

a и b – ширина и длина ПС соответственно, м;

l – минимальное расстояние между электродами, м.

Расположение заземляющих электродов изображено на рисунке 20.1.

$$L = 2 \cdot ((31 + 6) + (71 + 6)) = 228 \text{ м.}$$

$$n_{max} = \frac{228}{3} = 76.$$

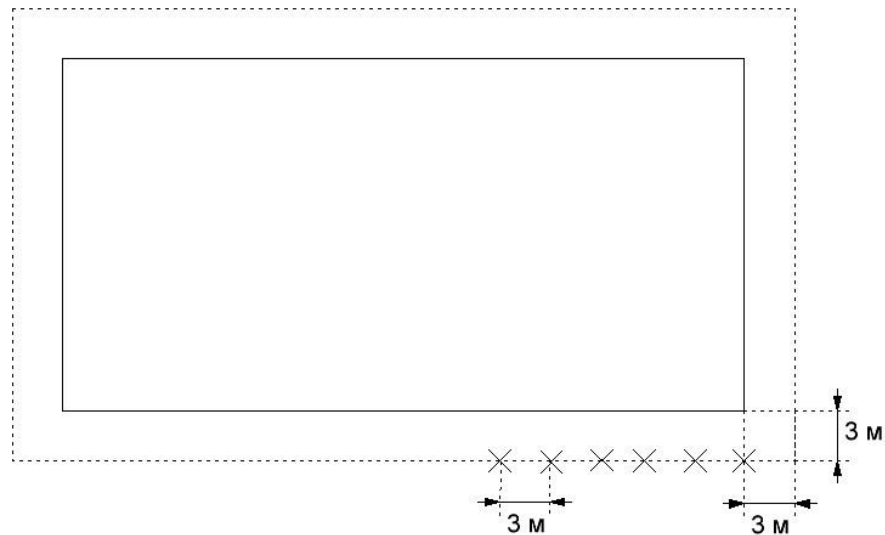


Рисунок 20.1 – Расположение заземляющих электродов

Определяется суммарное сопротивление вертикальных заземлителей:

$$R_B = \frac{R_{од}}{n \cdot \eta} \quad (20.4)$$

$$R_B = \frac{14,3}{65 \cdot 0,4} = 0,512 \text{ Ом}$$

Определяется сопротивление полосы по формуле:

$$R_{пол} = \frac{0,366 \cdot \rho \cdot K_M}{l \cdot \eta_{пол}} \cdot \lg \frac{2 \cdot l^2}{b \cdot t} \quad (20.5)$$

где l – длина полос, м;

$\eta_{пол}$ – коэф-т использования полос;

b – ширина соединительной полосы, м;

t – глубина соединительной полосы, м.

$$R_{пол} = \frac{0,366 \cdot 300 \cdot 1,6}{228 \cdot 0,2} \cdot \lg \frac{2 \cdot 228^2}{0,008 \cdot 0,8} = 13,28 \text{ Ом}$$

Определяется суммарное сопротивление:

$$R_{\Sigma} = \frac{R_B \cdot R_{пол}}{R_B + R_{пол}} \quad (20.6)$$

$$R_{\Sigma} = \frac{0,512 \cdot 13,28}{0,512 + 13,28} = 0,41 \text{ Ом}$$

Суммарное сопротивление заземляющего устройства должно не быть больше 0,5 Ом:

$$R_{\Sigma} < R_3 \quad (20.7)$$

0,41 Ом < 0,5 Ом.

Данное условие выполняется.

Определяется число заземлителей с соединительными полосами по формуле:

$$n = \frac{R_{од}}{R_{\Sigma} \cdot \eta}, \quad (20.8)$$

$$n = \frac{14,304}{0,493 \cdot 0,4} = 67,5.$$

Между вертикальными заземлителями расстояние равно:

$$a = \frac{L}{n} \quad (20.9)$$

$$a = \frac{228}{65} = 3,5 \text{ м.}$$

20.2 Грозозащита подстанции

К установке принимаются четыре стержневых молниеотвода высотой 17 м каждый.

Для определения превышения молниеотвода над объектами:

$$h_a = h - h_x \quad (20.10)$$

где h - высота молниеотвода, м;

h_x – высота объектов, м.

$$h_a = 17 - 5,5 = 11,5 \text{ м.}$$

Определяется диагональ прямоугольника, в углах которого расположены молниеотводы:

$$D = \sqrt{23^2 + 54^2} = 58,7 \text{ м.}$$

Схематично расположение молниеотводов изображено на рисунке 20.2.

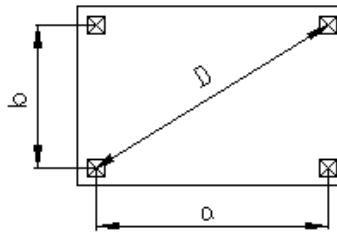


Рисунок 20.2 – Распределение молниеотводов

Условие защищенности всей площади подстанции заключается в выполнении неравенства:

$$D \leq 8 \cdot h_a, \quad (20.11)$$

$$58,7 \text{ м} < 8 \cdot 11,5 = 92 \text{ м.}$$

Условие защиты всей подстанции выполняется.

Заключение

Система электроснабжения должна обеспечивать питание электрической энергией разного рода потребителей. На первом месте по объему потребляемой электроэнергии стоит промышленность. По статистическим данным количество энергии для поддержания работы промышленного сектора достигает 60% от всей вырабатываемой энергии по стране. Благодаря электрической энергии на заводах в движение приводится огромное количество станков, механизмов, круглосуточно освещаются рабочие места, обеспечивается бесперебойное автоматическое управление различными технологическими процессами и др.

Качество электроэнергии играет важнейшую роль. Ведь низкое качество неизменно приводит к увеличению потерь в сети, к скорой амортизации оборудования, что влечет за собой увеличение финансовых затрат. Помимо качества необходимо обеспечивать необходимый уровень надежности и безопасности распределения электроэнергии. Также при проектировании не стоит забывать, что для эффективного функционирования предприятия схема электроснабжения должна быть удобна, экономична, технически современна.

В результате проектирования системы электроснабжения завода сельскохозяйственного машиностроения были определены осветительные и силовые нагрузки цехов всего предприятия, рассчитана суммарная мощность электрических нагрузок на предприятии. За источник питания выбрана главная понизительная подстанция. Спроектирована распределительная сеть предприятия: определено месторасположение центральных трансформаторных подстанций цехов, выбраны способ прокладки кабелей и их сечения всей распределительной сети. Осуществлен расчет токов короткого замыкания и по итогам выбрано и проверено устанавливаемое оборудование, а также кабели.

В целом предложенная схема электроснабжения отвечает требованиям надежности, качества, безопасности и экономичности.

Список используемых источников

1. Вахнина В.В., Самолина О.В., Черненко А.Н. Электроэнергетика и электротехника. Выполнение бакалаврской работы: учебно-методическое пособие для студентов направления 13.03.02 – Тольятти: ТГУ, 2019 – 35 с.
2. ГОСТ 14209-85 «Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки» – 36 с.
3. Каталог ЗАО "ОЗЭМИ" [Электронный ресурс]: URL: <http://orskemi.ru/katalog.html> (дата обращения: 20.03.2020).
4. Кудрин Б.И. Электроснабжение потребителей и режимы. Учеб. пособие - М.: МЭИ, 2013 – 183 с.
5. Ополева Г.Н. Схемы и подстанции электроснабжения: Справочник. Учеб. пособие – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2006 – 450 с.
6. Ополева Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов. Учеб. пособие – М.: ИНФРА-М, 2018 – 416 с.
7. Полуянович Н.К. Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий. Учеб. пособие - 3-е изд. – Санкт-Петербург: Лань, 2017 – 117 с.
8. Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электроэнергетических специальностей. Под ред. Б.И. Кудрина – М.: Высшая Школа, 2001 – 212 с.
9. Правила устройства электроустановок. Издание седьмое. «Издательство НЦ ЭНАС», 2003.
10. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования: РД 153-34.0-20.527-98. Под ред. Б.Н. Неклепаева – М.: НЦ ЭНАС, 2001 – 152 с.
11. Русина А.Г. Режимы электрических станций и электроэнергетических систем. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2014 – 400 с.

12. Федоренко М.А., Дуюн Т.А., Бондаренко Ю.А., Погонин А.А. Технология сельскохозяйственного машиностроения. Учеб. 2-е изд. – М.: ИНФРА-М, 2018 – 467 с.
13. Харечко В.Н., Харечко Ю.В. Основы заземления электрических сетей и электроустановок зданий. Третье издание – М.: ПТФ МИЭЭ, 2004 – 182 с.
14. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – СПб: ПЭИПК, 2003 – 350 с.
15. Щербаков Е.Ф., Александров Д.С., Дубов А.Л. Электроснабжение и электропотребление в сельском хозяйстве. Учеб. пособие – Санкт-Петербург: Лань, 2018 – 392 с.
16. Электротехнический справочник: Производство, передача и распределение электрической энергии томах. Под ред. В.Г. Герасимова – М.: МЭИ, 2002 – 964с.
17. Электроснабжение промышленных предприятий: требования к сетям и нюансы их проектирования [Электронный ресурс]: URL: <https://www.kp.ru/guide/ielektrosnabzhenie-promyshlennykh-predpriyatii.html> (дата обращения: 01.03.2020).
18. Электроэнергетика России: основные показатели функционирования и тенденции развития [Электронный ресурс]: URL: <https://www.hse.ru/data/2015/05/24/1097192707> (дата обращения: 01.03.2020).
19. Юндин М.А., Королев А.М. Курсовое и дипломное проектирование по электроснабжению сельского хозяйства – М.: Лань, 2011 – 320 с.
20. Янукович Г.И., Протосовицкий И.В., Зеленкевич А.И. Электроснабжение сельского хозяйства. Практикум – М.: Инфра-М, 2018 – 304 с.