

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

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электроснабжение

(направленность (профиль) / специализация)

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Проектирование системы электроснабжения инструментального завода

Обучающийся

В.В. Кочкаров

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент А.Н. Черненко

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

Тольятти 2024

## Аннотация

В данной бакалаврской работе проведена разработка проекта реконструкции системы электроснабжения инструментального завода.

Ключевым вопросом бакалаврской работы является разработка системы электроснабжения, с оптимизированными параметрами и требуемой надежностью.

Целью бакалаврской работы является разработка проекта системы электроснабжения инструментального завода. Для этого необходимо проанализировать электроприемники исследуемого предприятия, выполнить расчет электрических нагрузок, рассчитать и выбрать силовые трансформаторы, электрооборудование высокого и низкого уровней напряжения, оценить необходимость проведения мероприятий по компенсации реактивной мощности, определить основные параметры главной понижающей подстанции, определиться со схемой электроснабжения, составить электрические схемы, рассчитать токи короткого замыкания, подобрать электрооборудование и проверить его на электродинамическую стойкость.

Данная работа актуальна не только для предприятия по выпуску разнообразного инструмента, но и других аналогичных по назначению предприятий.

Данная бакалаврская работа содержит пояснительную записку объемом 61 страница, дополняемую 9 таблицами, 6 рисунками, а также 6 чертежами формата А1.

## Содержание

Введение.....	4
1 Структура системы электроснабжения инструментального завода .....	6
1.1 Область деятельности предприятия .....	6
1.2 Заводские потребители электрической энергии .....	6
1.3 Электропотребители электроцеха .....	8
2 Проектирование системы электроснабжения завода .....	10
2.1 Расчет электрических нагрузок завода .....	10
2.2 Расчет электрических нагрузок электроцеха .....	12
2.3 Расчетные электрические нагрузки 0,4 кВ цеховых ТП .....	14
2.4 Расчет системы освещения электроцеха.....	16
2.5 Картограмма и определение центра электрических нагрузок.....	17
2.6 Выбор числа и мощности трансформаторов ТП электроцеха.....	20
2.7 Компенсация реактивной мощности ТП электроцеха .....	22
2.8 Расчет потерь мощности в трансформаторах ТП электроцеха .....	23
2.9 Выбор мощности трансформатора ГПП.....	24
2.10 Релейная защита трансформатора ГПП.....	25
2.11 Расчет токов КЗ и выбор основного высоковольтного оборудования .....	32
2.12 Расчет токов КЗ и выбор электрооборудования на стороне 0,4 кВ .....	35
2.13 Электроснабжение электроцеха .....	39
3 Расчет защитного заземления и молниезащиты .....	43
3.1 Расчет защитного заземления ОРУ ГПП .....	43
3.2 Молниезащита .....	50
Заключение .....	55
Список используемых источников.....	57

## Введение

Актуальность работы состоит в необходимости проектирования новой системы электроснабжения на примере Новосибирского инструментального завода. Это один из старейших инструментальных заводов России, который в последнее время претерпел сильные изменения в технологическом плане: были организованы новые цеха и производства, обновился станочный и инструментальный парк, расширился ассортимент выпускаемой продукции. Существующая система электроснабжения перестала удовлетворять современным требованиям и возникла необходимость подготовить вариант новой системы электроснабжения завода, а не проекты частичной модернизации существующей системы.

Предметом деятельности инструментального завода является разработка, производство, ремонт инструмента, применяемого в машиностроении: твердосплавные резьбовые пластины и гребенки, борштанги, головки, кассеты, кулачки, подпятники, плашки, фрезы и т.д.

Практическая значимость состоит в разработке проекта электроснабжения, выборе трансформаторов, оборудования коммутации и защиты, силовых линий, а также в определении экономической эффективности.

Объектом исследования является инструментальный завод.

Предметом исследования являются схемы силовой сети, линии 0,4 и 10 кВ, силовые питающие трансформаторы, оборудование для коммутации и защиты линий, распределительные устройства, измерительное оборудование и заземление.

Цель работы – разработать проект электроснабжения инструментального завода, выбрать необходимое электротехническое оборудование и проверить его на электродинамическую стойкость.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- провести анализ действующих потребителей электроэнергии на заводе;
- рассчитать основные электрические нагрузки предприятия;
- выбрать схемы электрических соединений 0,4 и 10 кВ;
- выбрать коммутационное и защитное оборудование;
- выбрать компенсирующие устройства и силовые трансформаторы;
- рассмотреть вопросы молниезащиты.

Результатом данной работы будет являться разработанный проект электроснабжения инструментального завода, проверка его по различным условиям эксплуатации и критериям надежности в аварийных режимах работы.

В первом разделе проанализирована действующая на предприятии система электроснабжения, определены основные, наиболее крупные потребители электрической энергии. Во втором разделе выполнено непосредственно само проектирование системы заводского электроснабжения с подбором и оценкой оборудования, его проверкой, составлением электрических схем. В третьем разделе рассмотрены вопросы молниезащиты.

# 1 Структура системы электроснабжения инструментального завода

## 1.1 Область деятельности предприятия

«АО «Новосибирский инструментальный завод» сегодня – это одно из лидирующих предприятий страны по производству слесарно–монтажного инструмента. Значительные производственные площади, расположенные в черте города, близость транспортных развязок позволяет оперативно организовать производство и поставку продукции во все регионы России, страны СНГ и Балтии. Завод обладает полным технологическим циклом производства инструмента – от дизайнерской разработки изделия до его поставки потребителям: имеется кузнечно–заготовительное производство, проектирование и изготовление специального инструмента и оснастки, механическая обработка, нанесение электроизолирующих и декоративных покрытий на рукоятки изделий, собственное производство футляров для комплектации инструмента различного назначения» [1]

## 1.2 Заводские потребители электрической энергии

На территории инструментального завода расположено двадцать два отдельно стоящих здания, которые для упрощения назовем цехами. Электрические нагрузки цехов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Цеховые электрические нагрузки 0,4 кВ

Наименование цеха	Количество электроприемников (ЭП), ед	Установленная мощность ЭП, кВт		
		Минимальная	Максимальная	Общая
Метрологическая лаборатория	24	0,1	5,5	44,64

Продолжение таблицы 1

Наименование цеха	Количество электроприемников в (ЭП), ед	Установленная мощность ЭП, кВт		
		Минимальная	Максимальная	Общая
Цех металлообработки №1	54	0,54	10,5	764,88
Цех металлообработки №2	78	0,35	15,0	1125,6
Электроцех	25	0,2	14,0	401,34
Ремонтный цех	45	0,1	2,2	151,44
Главный корпус	28	0,2	2,5	54,4
Литейный цех	78	0,5	20,0	2102,72
Штамповочный цех	49	0,35	15,0	757,92
Цех производства слесарно-монтажного инструмента	54	0,2	12,0	939,68
Цех подготовки технических жидкостей и газов	18	0,4	10,5	109,9
Комплекс бытовых помещений	34	0,1	6,0	120
Котельная	32	1,0	8,5	328,96
Цех производства ключей и торцевых головок	21	0,45	10,5	186,4
Цех раскроя металла	14	0,5	15,5	415,12
Модельный цех	24	0,25	5,0	137,28
Термический цех	94	1,0	20,0	1881,44
Цех металлорежущих станков	41	0,7	12,5	488,96
Цех производства пресс-форм	30	0,25	2,8	99,92
Сборочный цех	58	0,1	5,0	444,16
Склад комплектующих и материалов (КиМ)	12	0,1	2,0	17,44
Сварочный цех	184	0,5	20,0	4254,88
Цех прецизионного инструмента	28	0,05	1,0	19,04
Итого	1025	–	–	14801,48

### 1.3 Электропотребители электроцеха

Основные электропотребители электроцеха представлены в таблице 2. В таблице 3 указаны электроприемники намоточного отделения №1 электроцеха.

Таблица 2 – Электропотребители электроцеха

Наименование цеха	Количество электроприемников (ЭП), ед	Установленная мощность ЭП, кВт		
		Минимальная	Максимальная	Общая
Служебные помещения	14	0,2	2,5	6,0
Бытовые помещения	12	0,2	2,5	10,0
Коллекторное отделение	18	0,1	1,0	16,0
Отделение пропитки	15	0,15	2,0	17,74
Механическое отделение	32	0,2	3,0	56,18
Намоточное отделение №1	53	0,6	14,0	195,1
Намоточное отделение №2	40	0,5	10,0	100,32
Итого	183	–	–	401,34

Таблица 3 – Электропотребители намоточного отделения №1 электроцеха

Наименование	Количество ЭП n, шт	Номинальная мощность одного ЭП, кВт	Суммарная мощность группы электроприемников	Номинальный ток группы ЭП, кА
Станок намоточный	20	2,4	48	182
Электрический калорифер	3	2,8	8,4	25,5
Станок оплеточный	12	0,6	7,2	27,6
Станок перемоточный	3	3	9	11,4

Продолжение таблицы 3

Наименование	Количество ЭП n, шт	Номинальная мощность одного ЭП, кВт	Суммарная мощность группы электроприемников	Номинальный ток группы ЭП, кА
Станок намоточный с ЧПУ	1	3,3	3,3	7,7
Вентилятор	2	14	28	53,2
Установка сатуроторная	2	2,2	4,4	6,6
Установка испытательная	4	7,5	30	56,8
Электрокалорифер	1	2,8	2,8	8,5
Ванна для лужения	4	10	40	60,8
Вентилятор вытяжной	1	14	14	26,6
Итого	53	62,6	195,1	466,7

Используя данные таблиц 1, 2 и 3 в следующем разделе произведем расчет электрических нагрузок предприятия и подбор электротехнического оборудования.

Выводы по разделу 1.

В данном разделе определены основные электрические характеристики предприятия по выпуску инструментальной продукции, а также некоторых его структурных подразделений – электроцеха и его намоточного отделения.

## 2 Проектирование системы электроснабжения завода

### 2.1 Расчет электрических нагрузок завода

«Основное значение имеет определение величины расчетных нагрузок, задающих выбор элементов сети по необходимой пропускной способности из условий нагрева. Для проверки элементов сетей по условиям перегрузки, выбора устройств и уставок защиты, проверки электрических сетей по условиям самозапуска двигателей требуется определение пиковых токов. В эксплуатации при работе электрооборудования и проводников в послеаварийном режиме, а также при росте нагрузок необходимы оценки нагрева изделий, чтобы исключить их длительную перегрузку, влияющую на ресурс работы. Поэтому правильное определение электрических нагрузок является решающим фактором при проектировании и эксплуатации электрических сетей систем электроснабжения» [21]. Используем данные, предоставленные предприятием и дополненные при анализе деятельности завода и заносим их в таблицу 4.

Таблица 4 – Электрические нагрузки основных цехов предприятия

Наименование цеха	Суммарная рассчитанная мощность, кВт	Суммарная мощность напряжением 0,4 кВ, кВт	Суммарная мощность напряжением 10 кВ, кВт	Осветительная нагрузка, кВт
Метрологическая лаборатория	44,64	26,4	0	18,24
Цех металлообработки №1	764,88	683,62	0	81,36
Цех металлообработки №2	1125,6	1079,2	0	81,84
Электроцех	401,34	393,72	0	7,62
Ремонтный цех	151,44	129,6	0	21,84
Главный корпус	54,4	24,0	0	30,4

Продолжение таблицы 4

Наименование цеха	Суммарная рассчитанная мощность, кВт	Суммарная мощность напряжением 0,4 кВ, кВт	Суммарная мощность напряжением 10 кВ, кВт	Осветительная нагрузка, кВт
Литейный цех	2102,72	703,36	1310,4	88,96
Штамповочный цех	757,92	697,68	0	60,24
Цех производства слесарно-монтажного инструмента	939,68	845,29	0	87,2
Цех подготовки технических жидкостей и газов	109,9	105,6	0	4,32
Комплекс бытовых помещений	120	89,6	0	30,4
Котельная	328,96	308,0	0	20,64
Цех производства ключей и торцевых головок	186,4	161,2	0	25,28
Цех раскроя металла	415,12	346,8	0	50,32
Модельный цех	137,28	128	0	9,36
Термический цех	5977,44	1829,76	4096	51,68
Цех металлорежущих станков	488,96	435,6	0	53,36
Цех производства пресс-форм	99,92	75,6	0	24,32
Сборочный цех	444,16	395,36	0	48,8
Склад комплектующих и материалов (КиМ)	17,44	8,64	0	8,8
Сварочный цех	4254,88	4238,8	0	16,08
Цех прецизионного инструмента	19,04	13,2	0	5,84
Итого	18952,33	12719,03	5406,4	826,9

Согласно таблицы 4, суммарная активная рассчитанная мощность по инструментальному заводу составила 18952,33 кВт.

## 2.2 Расчет электрических нагрузок электроцеха

«Определение расчетной нагрузки по цеху производится по методу тяжпромэлектропроекта. Этот метод заложен в основу «Руководящих указаний по расчету электрических нагрузок» (РТН.36.18.32.4 – 92)» [23].

«Номинальная мощность электрооборудования рассчитывается по формуле» [21]:

$$P_n = S_{ном} \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{\frac{ПВ}{100}}, \quad (1)$$

где «ПВ – продолжительность включения, %;

$S_{ном}$  – полная номинальная мощность ЭП, кВА» [21].

«Средняя активная мощность» [21]:

$$P_{cp} = k_u \cdot P_{ном}, \quad (2)$$

где « $k_u$  – коэффициент использования;

$P_{ном}$  – номинальная мощность группы ЭП, кВт» [21].

«Средняя реактивная мощность» [30]:

$$Q_{cp} = P_{cp} \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (3)$$

где « $\operatorname{tg} \varphi$  – коэффициент реактивной мощности соответствующий  $\cos \varphi = 0,65$ ;

$P_{cp}$  – средняя за наиболее загруженную смену активная мощность, кВт» [21]

«Средний коэффициент использования по заводу в целом составляет» [20]:

$$k_u = \frac{\sum_1^N P_{cp}}{\sum_1^N P_{ном}}, \quad (4)$$

где « $N$  – число характерных категорий ЭП, входящих в данную группу» [20].

«Эффективное число электроприёмников  $n_э$  в целом по заводу определяется по формуле» [28]:

$$n_э = \frac{2 \cdot \sum P_{ном}}{P_{н.макс}}, \quad (5)$$

где « $P_{н.макс}$  – номинальная мощность наибольшего электроприёмника входящего в состав группы ЭП, кВт» [20].

«Расчет нагрузок на шинах 0,4 кВ, учитывая все представленные параметры и условия» [20]:

$$P_p = K_p \cdot P_{cp}, \quad (6)$$

$$Q_p = K_p \cdot Q_{cp}, \quad (7)$$

где « $K_p$  – коэффициент расчетной нагрузки;

$P_{cp}$ ,  $Q_{cp}$  – суммарное расчётное значение на шинах 0,4 кВ, кВт и квар, соответственно» [20].

«Полная мощность без учёта компенсации реактивной мощности» [20]:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} . \quad (8)$$

Токовая расчетная нагрузка:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_H}, \quad (9)$$

Полученные данные по цехам вносим на чертеж графической части проекта. «Расчетные значения  $P_p$ ,  $Q_p$ ,  $S_p$ ,  $I_p$  используются в дальнейшем для выбора силовых понижающих трансформаторов, устанавливаемых в цехе, а также коммутационной аппаратуры и питающих линий» [20].

### **2.3 Расчетные электрические нагрузки 0,4 кВ цеховых ТП**

«Для выполнения расчета, как исходные данные, используются агрегированные электрические характеристики цехов данного предприятия, включающие такие параметры, как общая установленная мощность оборудования и эффективное число электроприемников, используемых в каждом из цехов» [20]. Ввиду того, что состав конкретных электроприемников заранее неизвестен, однако определены их совокупные мощности, расчетные значения выбираются по укрупненным показателям, позволяющим учесть такие условия. Расчеты производятся отдельно, отдельно для группы низковольтных электроприемников и отдельно для высоковольтных. «Значения коэффициентов использования и мощности определяются в соответствии с групповой принадлежностью каждого цеха и характером его нагрузки. В процессе расчетов принимается, что коэффициенты по активной мощности и реактивной мощности считаются равными друг другу, что упрощает итоговые расчеты и делает их более точными в таких условиях» [20].

Потребляемая цеховой системой освещения активная мощность:

$$P_{\text{росв}} = k_c \cdot P_{\text{удосв}} \cdot F_y, \quad (10)$$

где  $F_y$  – площадь цеха,  $\text{м}^2$ ;

$k_c$  – коэффициент спроса на осветительную нагрузку, равный 0,85 для цехов основного производства и 0,9 для цехов вспомогательного;  $P_{\text{удосв}}$  – удельная расчетная мощность освещения, равная 0,015 кВт/м<sup>2</sup> для цехов с необходимой высокой освещенностью; 0,01 кВт/м<sup>2</sup> – для цехов с необходимой средней освещенностью; 0,005 кВт/м<sup>2</sup> – для цехов с необходимой низкой освещенностью» [20].

Принимаем равенство:

$$P_{\text{росв}} = Q_{\text{росв}}, \quad (11)$$

Тогда полная мощность цехов и трансформаторных подстанций:

$$S_p = \sqrt{(P_p + P_{\text{росв}})^2 + (Q_p + Q_{\text{росв}})^2}, \quad (12)$$

Используя данные таблиц 1 и 4, сгруппируем потребителей и определим активные мощности цеховых трансформаторных подстанций:

- ТП–1 1011,9 кВт;
- ТП–2 1407 кВт;
- ТП–3 613,9 кВт;
- ТП–4 2846 кВт напряжения 0,4 кВ и 1638 кВт напряжением 10 кВ;
- ТП–5 1180,4 кВт;
- ТП–6 и ТП–7 1174 кВт;
- ТП–8 548,6 кВт;
- ТП–9 518,9 кВт;

- ТП–10 и ТП–11 2352 кВт;
- ТП–12 782,8 кВт;
- ТП–13 148,7 кВт;
- ТП–14 577 кВт;
- ТП–15 1829,76 кВт напряжения 0,4 кВ и 4096 кВт напряжением 10 кВт.

## 2.4 Расчет системы освещения электроцеха

Расчет выполнен по методу коэффициента использования [16]. В качестве светильников используем:

- Faldi Lunar–18 (светодиодный аналог светильника НББ–60);
- Faldi Atlant–100 (светодиодный аналог светильника РСР05–250–032);
- Navigator NLP–OS2 (светодиодный аналог ЛПО 2×40).

Полученные данные расчета сведем в таблицу 5.

Таблица 5 – Данные по светильникам электроцеха

Номер группы	Потребители (количество)	Показатели			Проводка			Защитные аппараты	
		$P_p$ , Вт	$\cos\varphi$	$I_p$ , А	марка, сечение	способ прокладки	$I_n$ , А	тип	$I_{уст}$ , А
1–1	Navigator NLP–OS2 (23)	776	0,955	1,56	ВВНнг–LS(3×1,5)	в коробе	21	S233	6
1–2	Faldi Atlant–100 (12)	1200	0,955	2,42	ВВНнг–LS(3×1,5)	в коробе	21	S233	16
1–3	Faldi Atlant–100 (11)	1100	0,955	2,22	ВВНнг–LS(3×1,5)	в коробе	21	S233	6
1–4	Faldi Atlant–100 (11)	1100	0,955	2,22	ВВНнг–LS(3×1,5)	в коробе	21	S233	6
1–5	Faldi Atlant–100 (3), Faldi Lunar–18 (1)	324	0,955	0,65	ВВНнг–LS(3×1,5)	в коробе	21	S233	6
2–1	Faldi Atlant–100 (11)	1100	0,955	2,22	ВВНнг–LS(3×1,5)	в коробе	21	S231	6

Продолжение таблицы 5

Номер группы	Потребители (количество)	Показатели			Проводка			Защитные аппараты	
		P <sub>p</sub> , Вт	cosφ	I <sub>p</sub> , А	марка, сечение	способ прокладки	I <sub>н</sub> , А	тип	I <sub>уст</sub> , А
2–2	Faldi Atlant–100 (9)	900	0,955	1,82	ВВНнг–LS(3×1,5)	в коробе	21	S231	6
2–3	РСП 05–250–032 (11), Faldi Lunar–18 (1)	1124	0,955	2,27	ВВНнг–LS(3×1,5)	в коробе	21	S231	6
Итого	–	7624	0,955	15,38	–	–	–	–	–

В электротехнической ведомости группа 1 (1–1, 1–2, 1–3, 1–4, 1–5) является рабочим освещением, модель щитка освещения – ОЩВ–6. Питание освещения электроцеха осуществляется от ТПЗ.

Общий ток системы освещения электроцеха:

$$I_p = \frac{\sum P_p \cdot K_c}{3 \cdot \cos \varphi \cdot U_\phi}, \quad (13)$$

где «K<sub>c</sub> – коэффициент спроса (K<sub>c</sub> = 0,9)» [16]

$$I_p = \frac{7624 \cdot 0,9}{3 \cdot 0,955 \cdot 220} = 10,88 \text{ А.}$$

Принимаем к установке для питания ОЩВ–6 кабель ВВНнг–LS(5×2,5) и автоматический выключатель ВА47–100 (I<sub>н</sub> = 25 А).

## 2.5 Картограмма и определение центра электрических нагрузок

Одной из задач, решаемых на стадии проектирования заводской системы электроснабжения является уменьшение затрат на основные электротехнические материалы и оборудование [31]. Это достигается рациональным размещением точки ввода электрической энергии на предприятии. В этой точке, называемой центром электрических нагрузок (ЦЭН), размещается главная

понижительная подстанция (ГПП). Чем меньше и более равномерно размещение цеховых трансформаторных подстанций от ЦЭН тем меньше затраты электротехнических материалов и меньше финансовые затраты на их приобретение. Также не стоит забывать о том, что чем протяжённее линия электропередачи, тем в них больше потери электроэнергии. Удобно определять эту точку ввода с помощью построения картограммы нагрузок (КН). На данной схеме цеховые потребители обозначаются в виде кругов. Чем больше диаметр круга, тем больший вклад данный потребитель электрической энергии вносит в общезаводское потребление. При этом формула для определения радиус окружности выглядит следующим образом:

$$r_i = \sqrt{\frac{(P_{pi} + P_{p.o.i})}{\pi \cdot m}}, \quad (14)$$

где « $P_{pi} + P_{p.o.i}$  – расчётная силовая и осветительная нагрузка цехов, кВт;

$m$  – выбранный масштаб, принимаем  $m=10$  кВт/мм<sup>2</sup>» [28].

«Координаты центра» [28]:

$$x_0 = \frac{\sum(x_i \cdot (P_{pi} + P_{p.o.i}))}{\sum(P_{pi} + P_{p.o.i})}, \quad (15)$$

$$y_0 = \frac{\sum(y_i \cdot (P_{pi} + P_{p.o.i}))}{\sum(P_{pi} + P_{p.o.i})}, \quad (16)$$

где « $x_i, y_i$  – координаты центров цехов, мм» [28].

Подобным же образом по формулам (14...16) определяются остальные электроприемники, а результаты сводятся в таблицу 6. Центр нагрузок расположен по координатам:  $x_0=316,7$  м,  $y_0=219,4$  м.

Таблица 6 – Картограмма электрических нагрузок предприятия

Наименование цехов	$P_{pi}$ , кВт	$P_{p.пi}$ , кВт	$P_{p.вi}$ , кВт	$P_{p.оi}$ , кВт	$X_i$ , м	$Y_i$ , м	$R_i$ , мм	$\alpha_{ni}$	$\alpha_{vi}$	$\alpha_{oi}$
Метрологическая лаборатория	44,64	26,4	0	18,24	24	8	6,4	170,4	0	117,6
Цех металлообработки №1	764,88	683,62	0	81,36	37,6	80,8	26,4	257,6	0	30,4
Цех металлообработки №2	1125,6	1079,2	0	81,84	48	195,2	32	276	0	12
Электроцех	401,34	317,84	0	21,84	48	261,6	17,6	269,6	0	18,4
Ремонтный цех	151,44	129,6	0	21,84	48	308	12	246,4	0	41,6
Главный корпус	54,4	24,0	0	30,4	100,8	8	7,2	127,2	0	160,8
Литейный цех	2102,72	703,36	1310,4	88,96	153,6	77,6	44	96	179	12
Штамповочный цех	757,92	697,68	0	60,24	136	157,6	26,4	264,8	0	23,2
Цех производства слесарно-монтажного инструмента	939,68	845,29	0	87,2	164	249,6	29,6	261,6	0	26,4
Цех подготовки технических жидкостей и газов	109,9	105,6	0	4,32	117,6	303,2	10,4	276,8	0	11,2
Комплекс бытовых помещений	120	89,6	0	30,4	184,8	8	10,4	215,2	0	72,8
Котельная	328,96	308,0	0	20,64	177,6	310,4	17,6	260,6	0	18,4
Цех производства ключей и торцевых головок	186,4	161,2	0	25,28	204	149,6	12,8	248,8	0	39,2
Цех раскроя металла	415,12	346,8	0	50,32	269,9	64	19,2	252,8	0	35,2
Модельный цех	137,28	128	0	9,36	275,2	318,4	11,2	268,8	0	19,2
Термический цех	5977,44	1829,76	4096	51,68	280,8	154,4	41,6	280	277,6	8
Цех металлорежущих станков	488,96	435,6	0	53,36	324	240	20,8	256,8	0	31,2
Цех производства пресс-форм	99,92	75,6	0	24,32	364	68,8	9,6	217,6	0	70,4
Сборочный цех	444,16	395,36	0	48,8	368,8	158,4	20	256	0	32
Склад комплектующих и материалов (КиМ)	17,44	8,64	0	8,8	436	149,6	4	142,4	0	146,4
Сварочный цех	4254,88	4238,8	0	16,08	439,2	220	62,4	9,6	0	0,8
Цех прецизионного инструмента	19,04	13,2	0	5,84	449,6	64	4	199,2	0	88,8
Итого	18952,33	12719,03	5406,4	826,9	316,7	219,4	445,6	4854,2	456,6	101,6

## 2.6 Выбор числа и мощности трансформаторов ТП электроцеха

«Мощность трансформаторов, предназначенных для установки на цеховых трансформаторных подстанциях, определяется целым рядом существенных факторов» [33]. К их числу относятся: объем нагрузки, подаваемой на трансформаторы подстанции, уровень надежности электроснабжения, к которому относится оборудование, и также размеры площади, выделенной для их размещения. При условии равномерно распределенной нагрузки рекомендуется понижать единичную мощность трансформаторов по мере увеличения площади цеха. Это связано с тем, что уменьшение мощности трансформаторов позволяет сократить длину питающих линий, питающих оборудование цеха, а также снижает потери электроэнергии в этих линиях.

«Кроме того, существует экономически обоснованная взаимосвязь между оптимальной площадью, отводимой под размещение каждого отдельного трансформатора на цеховой трансформаторной подстанции, и плотностью электрической нагрузки в цехе. Данная зависимость была выявлена на основании комплексных технико–экономических расчетов и служит основой для определения оптимальной структуры цехового энергоснабжения» [33].

«Плотность электрической нагрузки определяется по формуле» [10]:

$$\sigma = \frac{S_{расч}}{S}, \text{ кВА/м}^2, \quad (17)$$

$$S_{расч} = \sqrt{(P_{расч} + P_{p,o})^2 + (Q_{расч} + Q_{p,o})^2}, \quad (18)$$

где « $S_{расч}$  – полная расчетная мощность цеха, кВА;

$S$  – площадь цеха, м<sup>2</sup>.

$P_{расч}, Q_{расч}$  – активная и реактивная силовые нагрузки цеха, кВт, квар;

$P_{p,o}, Q_{p,o}$  – активная и реактивная осветительные нагрузки» [10].

«Плотность электрической нагрузки определяется на основе предположения о равномерном распределении всех электрических нагрузок по общей площади производственного цеха» [10], что позволяет учитывать специфику его электрической структуры и равномерность энергопотребления. Мощность трансформаторов изменяется с учетом расчетной нагрузки цеха, а также корректируется в зависимости от категории нагрузки, что позволяет оптимизировать распределение мощности и повысить эффективность энергоснабжения для различных производственных участков.

На величину и выбор мощности трансформаторов оказывают влияние такие важные факторы, как категория нагрузки, число типоразмеров используемых трансформаторов на данном предприятии, а также уровень унификации оборудования, что способствует улучшению надежности и безопасности системы электроснабжения. Дополнительно в расчет мощности трансформаторов включаются прочие факторы, которые также играют значительную роль в обеспечении оптимальной работы электросистемы предприятия, особенно в условиях варьирующего энергопотребления и сложной инфраструктуры производственных объектов.

«Количество трансформаторов на ТП–3» [10]:

$$N_T = \frac{P_p}{k_{здоп} \cdot S_{HT}}, \quad (19)$$

где « $P_p$ – расчетная активная нагрузка цеха от низковольтных потребителей, кВт;

$k_{здоп}$ – допустимый коэффициент загрузки трансформаторов в нормальном режиме. Принимается равным: 0,6...0,7 для ТП, питающей потребителей 1 категории; 0,7...0,8 для ТП, питающей

потребителей 2 категории; 0,9...0,95 для ТП, питающей потребителей 3 категории по надежности электроснабжения.

$S_{нт}$  – выбранная номинальная мощность трансформаторов цеховых ТП, кВ·А» [10].

$$N_T = \frac{401,34}{0,7 \cdot 400} = 1,43$$

Принимается ближайшее целое число трансформаторов – 2. Выбираем трансформатор ТМЗ–400/10/0,4 [23].

## 2.7 Компенсация реактивной мощности ТП электроцеха

«Наибольшая реактивная мощность, которую трансформаторы могут пропустить из сети 10 кВ в сеть с напряжением 0,4 кВ» [22]:

$$Q_{\max} = \sqrt{(n \cdot k_3 \cdot S_{н.т.})^2 - P_{расч}^2}, \quad (20)$$

где « $n$  – количество трансформаторов на ТП;

$k_3$  – коэффициент загрузки трансформатора,  $k_3 = 0,7$ ;

$S_{н.т.}$  – номинальная мощность трансформаторов ТП, кВА;

$P_{расч}$  – расчётная активная нагрузка ТП на шинах 0,4 кВ, кВт» [4].

$$Q_{max} = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 400)^2 - 401,34^2} = 390 \text{ квар.}$$

Для ТП–3 электроцеха:

$$Q_{нкл} = Q_{расч} - Q_{\max}, \quad (21)$$

где « $Q_{расч}$  – расчётная реактивная нагрузка ТП на шинах 0,4 кВ, квар» [4].

$$Q_{нк1} = 644,8 - 390 = 254,8 \text{квар}$$

Компенсирующее устройство:

$$Q_{нк2} = Q_{расч} - Q_{нк1} - \gamma \cdot n \cdot S_{н.т.}, \quad (22)$$

где  $\gamma$  – расчётный коэффициент, зависящий от двух  $K_{p1}$  и  $K_{p2}$  расчётных параметров [4].

$$Q_{нк2} = 644,8 - 254,8 - 0,56 \cdot 2 \cdot 400 = -58 \text{квар}$$

Полученное значение отрицательное, значит для ТП–3 компенсация реактивной мощности достаточная.

«Проверяем фактический коэффициент загрузки трансформаторов в нормальном режиме» [4]:

$$k_3 = \frac{\sqrt{P_{расч}^2 + (Q_{расч} - Q_{нк1})^2}}{n \cdot S_{н.т.}}, \quad (23)$$

$$K_3 = \frac{\sqrt{401,34^2 + (644,8 - 254,8)^2}}{2 \cdot 400} = 0,504.$$

Коэффициент загрузки имеет допустимое значение.

## 2.8 Расчет потерь мощности в трансформаторах ТП электроцеха

«Потери активной и реактивной мощности в силовых трансформаторах ТМЗ–400/10/0,4 ТП–3 определяются по формулам» [9]:

$$\Delta P_T = N \cdot (P_{xx} + k_{3н}^2 \cdot P_{к3}), \quad (24)$$

$$\Delta Q_T = N \left( \frac{i_{xx}}{100} S_{нг} + k_{3н}^2 \frac{u_k}{100} S_{нг} \right), \quad (25)$$

где « $P_{xx} = 0,9$  кВт,  $P_{кз} = 5,5$  кВт,  $i_{xx} = 1,8\%$ ,  $u_k = 4,5\%$  – паспортные данные трансформатора ТМЗ–400/10/0,4;

$N=2$  – число трансформаторов, установленных на ТП-3» [9].

$$\Delta P_T = 2 \cdot (0,9 + 0,504^2 \cdot 5,5) = 4,59 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_T = 2 \left( \frac{1,8}{100} 400 + 0,504^2 \frac{4,5}{100} 400 \right) = 23,54 \text{ квар}.$$

«Потери электрической энергии в трансформаторах» [9]:

$$\Delta A_\tau = N \cdot (P_{xx} \cdot T_{\text{год}} + k_{3H}^2 \cdot P_{кз} \cdot \tau), \quad (24)$$

$$\tau = \left( 0,124 + \frac{T_M}{10^4} \right)^2 \cdot T_{\text{год}}, \quad (25)$$

где « $\tau$  – годовое число часов максимальных потерь;

$T_\Gamma = 8760$  часов – годовое число часов работы предприятия;

$T_M$  – годовое число часов использования получасового максимума активной нагрузки, берется из справочника: « $T_M = 3770$  часов» [9].

$$\tau = \left( 0,124 + \frac{3770}{10^4} \right)^2 \cdot 8760 = 2198 \text{ ч},$$

$$\Delta A_\tau = 2 \cdot (0,9 \cdot 8760 + 0,504^2 \cdot 5,5 \cdot 2198) = 21911 \text{ кВт/ч}.$$

## 2.9 Выбор мощности трансформатора ГПП

Нагрузка 10 кВ трансформатора ГПП:

$$P_{\text{ГПП}} = 0,8(P_{\text{рн}} + \Delta P_T + P_{\text{рв}}) + 1,0(P_{\text{росв.н}} + P_{\text{росв.тер}}), \quad (26)$$

где  $P_{\text{рн}} = 12643,1$  кВт – заводская активная нагрузка без освещения из таблицы 6;

$\Delta P_T = 4,59$  кВт – активные потери в трансформаторах ГПП;

$P_{\text{росв.н}} = 841,1$  кВт – заводская активная нагрузка освещения из таблицы 6;

$P_{\text{росв.тер}} = 250$  кВт – заводская активная нагрузка уличного освещения [1];

$P_{\text{рв}} = 5406,4$  кВт – заводская активная высоковольтная нагрузка из таблицы 6

$$\begin{aligned} P_{\text{гпп}} &= 0,8(12643,1 + 4,59 + 5406,4) + 1,0(841,1 + 250) \\ &= 15784,37 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

Рациональный уровень высокого напряжения:

$$U_{\text{рац}} = 4,34 \sqrt{L_i + 0,016 \frac{P_{\text{гпп}}}{2}}, \quad (27)$$

где  $L_i = 3$  км – расстояние до распределительной подстанции

$$U_{\text{рац}} = 4,34 \sqrt{3 + 0,016 \frac{15784,37}{2}} = 49,34 \text{ кВ.}$$

Принимаем большее стандартное значение 110 кВ.

В качестве основного трансформатора ГПП выбираем ТДН–16000/110/10 [25]. Схема внешнего электроснабжения на 110 кВ представлены на рисунке 2.

## 2.10 Релейная защита трансформатора ГПП

На ГПП установлены два ТДН–16000/110/10. Релейную защиту построим на базе микропроцессорного устройства защиты «Сириус-Т» [6].

Дифференциальная защита.

«Максимальный ток трехфазного короткого замыкания, приведенный к

стороне высшего напряжения силового трансформатора» [19]:

$$I_{k.max}^{(3)} = \frac{I_{кз} \cdot U_{cp2}}{U_{cp1}}, \quad (28)$$

где « $I_{кз} = 6,07$  кА – ток короткого замыкания на шинах 10 кВ ГПП

(рассчитывается далее);

$U_{cp.1}, U_{cp.2}$  – среднее напряжение высокой и низкой сторон силового трансформатора» [19].

$$I_{k.max}^{(3)} = \frac{6070 \cdot 10500}{11000} = 5794 \text{ А.}$$

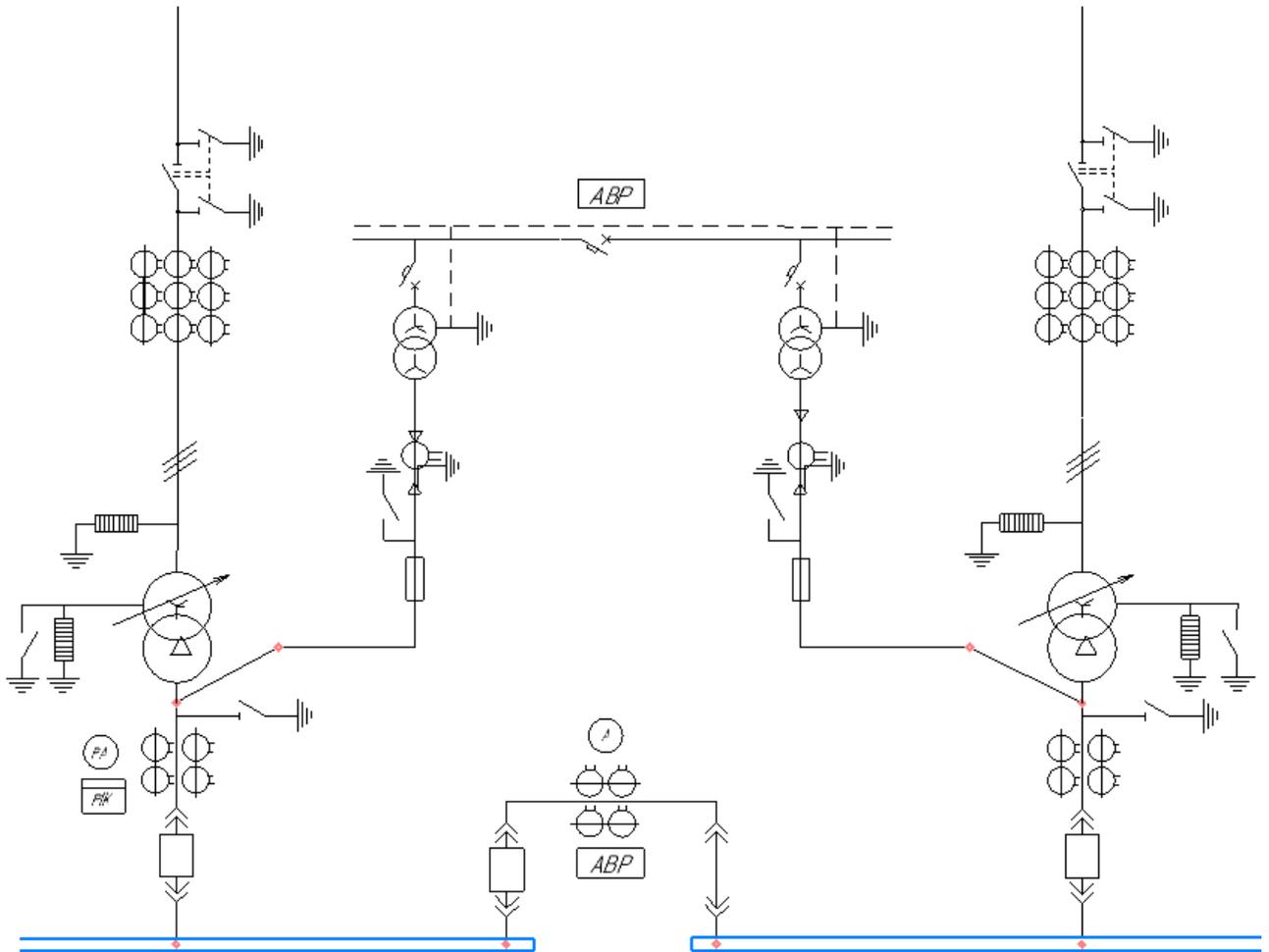


Рисунок 2 – Схема внешнего электроснабжения напряжением 110 кВ

«Минимальный ток двухфазного короткого замыкания на шинах 10 кВ ГПП, приведенный к стороне высшего напряжения силового трансформатора» [19]:

$$I_{k.min}^{(3)} = \frac{I_{k.max}^{(3)} \cdot \sqrt{3}}{2}, \quad (29)$$

$$I_{k.min}^{(3)} = \frac{5794 \cdot \sqrt{3}}{2} = 5017 \text{ A.}$$

«Первичный и вторичный номинальные токи силового трансформатора» [19]:

$$I_{НОМ}^{ВН} = \frac{S_{ТН}}{\sqrt{3} \cdot U_{ВН}}, \quad (30)$$

$$I_{НОМ}^{НН} = \frac{S_{ТН}}{\sqrt{3} \cdot U_{НН}}, \quad (31)$$

$$I_{НОМ}^{ВН} = \frac{16000}{\sqrt{3} \cdot 110} = 83,97 \text{ A,}$$

$$I_{НОМ}^{НН} = \frac{16000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 880 \text{ A,}$$

«Для выбора трансформаторов тока найдем максимальные рабочие токи: на стороне высшего напряжения» [19]:

$$I_{\text{макс.раб}}^{ВН} = 1,4 \cdot I_{НОМ}^{ВН}, \quad (32)$$

$$I_{\text{макс.раб}}^{НН} = 1,4 \cdot I_{НОМ}^{НН}, \quad (33)$$

$$I_{\text{макс.раб}}^{ВН} = 1,4 \cdot 83,97 = 117,56 \text{ A,}$$

$$I_{\text{макс.раб}}^{НН} = 1,4 \cdot 880 = 1232 \text{ A.}$$

На стороне ВН выбираем к установке ТТ типа ТФЗМ110–У1–200–0,5/10р/10р:  $I_{1Н} = 200 \text{ A}$ ,  $I_{2Н} = 5 \text{ A}$ ,  $k_I^{ВН} = 40$  [26].

На стороне НН принимаем к размещению трансформатор тока типа ТОЛ–10–1500–0,5/10Р:  $I_{1Н} = 1500 \text{ А}$ ,  $I_{2Н} = 5 \text{ А}$ ,  $k_I^{НН} = 300$  [24].

«Вторичные токи трансформаторов тока в номинальном режиме работы» [19]:

$$I_2^{ВН} = \frac{k_{сх}^{ВН}}{k_I^{ВН}} \cdot I_{НОМ}^{ВН}, \quad (34)$$

$$I_2^{НН} = \frac{k_{сх}^{ВН}}{k_I^{ВН}} \cdot I_{НОМ}^{НН}, \quad (35)$$

$$I_2^{ВН} = \frac{\sqrt{3}}{40} \cdot 83,97 = 3,636 \text{ А},$$

$$I_2^{ВН} = \frac{1}{300} \cdot 880 = 2,933 \text{ А}.$$

«Определим ток небаланса  $I'_{Нб}$ » [19]:

$$I'_{Нб} = k_{одн} \cdot k_a \cdot \varepsilon \cdot I_{к.макс}^{(3)}, \quad (36)$$

где « $k_{одн} = 1$  – коэффициент однотипности трансформаторов тока;

$k_a = 1$  – коэффициент апериодической составляющей для дифференциального реле;

$\varepsilon = 0,1$  – допустимая погрешность трансформаторов тока» [26]

$$I'_{Нб} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,1 \cdot 5794 = 579,4 \text{ А}.$$

«Определим ток небаланса  $I''_{Нб}$ » [19]:

$$I''_{Нб} = (\Delta u_\alpha + \Delta u_\beta) \cdot I_{к.макс}^{(3)}, \quad (37)$$

где « $\Delta u_\alpha = 0,16$  — пределы регулирования напряжения на стороне ВН;

$\Delta u_\beta = 0$  — пределы регулирования напряжения на стороне СН» [26].

$$I''_{Нб} = (0,16 + 0) \cdot 5794 = 927,04 \text{ А}.$$

«Предварительное значение тока срабатывания защиты по условию отстройки от токов небаланса» [19]:

$$I_{сз} = k_{отс}(I'_{нб} + I''_{нб}), \quad (38)$$

где « $k_{отс} = 1,2$  – коэффициент отстройки от токов небаланса» [19];

$$I_{сз} = 1,2(579,4 + 927,04) = 1807,73 \text{ А.}$$

«Ток срабатывания защиты по условию отстройки от броска тока намагничивания» [19]:

$$I_{сз} = k_{отс} \cdot I_{НОМ}^{ВН}, \quad (39)$$

где « $k_{отс} = 0,5$  – коэффициент отстройки от токов небаланса» [19];

$$I_{сз} = 0,5 \cdot 83,97 = 41,98 \text{ А.}$$

Из двух токов срабатывания выбираем наибольший, то есть  $I_{сз} = 1807,73 \text{ А}$ .

Найдем предварительное число коэффициента чувствительности:

$$k_{ч} = \frac{I_{к.мин}^{(3)}}{I_{сз}}, \quad (40)$$

$$k_{ч} = \frac{5017}{1807,73} = 2,77 > 2.$$

«Ток срабатывания защиты по условию отстройки от максимального рабочего тока при возможной перегрузке трансформаторов» [24]:

$$I_{сз} = \frac{k_{отс} \cdot I_{макс.раб}^{ВН}}{k_{в}}, \quad (41)$$

где « $k_{отс} = 1,2$  – коэффициент отстройки» [24];

« $k_B = 0,9$  – коэффициент возврата» [24]

$$I_{сз} = \frac{1,2 \cdot 117,56}{0,9} = 156,75 \text{ А}$$

«Определим коэффициент чувствительности в основной зоне» [24]:

$$k_{ч} = \frac{I_{к3.мин}^{(3)}}{I_{сз}}, \quad (42)$$
$$k_{ч} = \frac{775}{156,75} = 4,94 > 1,5.$$

«Определим коэффициент чувствительности в зоне резервирования» [24]:

$$k_{ч} = \frac{I_{к4.мин}^{(3)}}{I_{сз}}, \quad (43)$$
$$k_{ч} = \frac{682}{156,75} = 4,35 > 1,2.$$

Ток срабатывания реле:

$$I_{ср} = \frac{\sqrt{3}}{40} \cdot I_{сз}, \quad (44)$$
$$I_{ср} = \frac{\sqrt{3}}{40} \cdot 156,75 = 6,78 \text{ А.}$$

Применим трансформаторы тока ТФЗМ110–У1–200–0,5/10р/10р, соединенные по схеме полного треугольника [26]. В этом случае коэффициент схемы  $k_{сх} = \sqrt{3}$ .

Максимальная токовая защита от перегруза.

Ток срабатывания защиты по формуле (41):

$$I_{сз} = \frac{1,05 \cdot 117,56}{0,9} = 137,15 \text{ A.}$$

«Ток срабатывания реле» [5]:

$$I_{ср} = \frac{I_{сз}}{n_1}, \quad (45)$$
$$I_{ср} = \frac{137,15}{40} = 3,43 \text{ A.}$$

Газовая защита [34].

«Газовая защита представляет собой основной механизм, который обеспечивает защиту трансформаторов от витковых замыканий, а также от других типов внутренних повреждений, возникающих в результате разложения трансформаторного масла и выделения газа в процессе эксплуатации. В системе газовой защиты предусмотрены два независимых реагирующих элемента, каждый из которых оснащен отдельным входом для более точного реагирования на возникающие аномалии. Первый элемент активируется в случаях, когда наблюдается слабое газообразование, сопровождающееся незначительным снижением уровня масла в баке. Этот элемент выполняет функцию подачи сигнального оповещения» [2].

«Второй элемент вступает в действие при интенсивном процессе газообразования, который вызывает перемещение масла в сторону расширителя. Движение масла с определенной скоростью вызывает срабатывание нижнего элемента, предназначенного для отключения трансформатора без выдержки времени. Этот же элемент активируется, если уровень масла продолжает снижаться до критического значения. Уставка скоростного элемента, отвечающего за отключение трансформатора, определяется с учетом мощности силового трансформатора и типа системы его охлаждения. Поскольку в данном случае трансформатор имеет мощность 16

МВА и оснащен системой охлаждения типа Д, уставка скоростного элемента устанавливается на уровне 0,6 м/с для обеспечения корректной и надежной работы защиты» [2].

## 2.11 Расчет токов КЗ и выбор основного высоковольтного оборудования

Исходная схема и схема замещения расчета короткого замыкания приведена на рисунке 3.

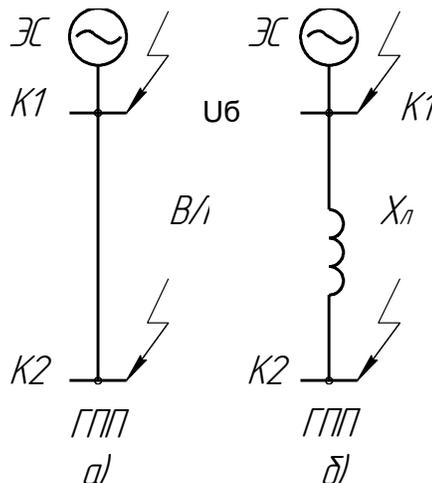


Рисунок 3 – Исходная схема (а) и схема замещения (б)

Согласно [1], «мощность КЗ на шинах подстанции энергосистемы 3000 МВ·А. Базисную мощность задаем на уровне  $S_{\delta} = 1000$  МВА, а базисное напряжение  $U_{\delta} = 115$  кВ» [1].

«Сопротивление системы в относительных единицах» [18]:

$$X_c = \frac{S_{\delta}}{S_c}, \quad (46)$$

«Сопротивление воздушной линии» [18]:

$$X_l = \frac{X_0 \cdot S_{\delta} \cdot l_{21}}{U_{\delta 1}^2}, \quad (47)$$

«Ток короткого замыкания в точке К–1 (периодическая составляющая принимается постоянной в течение всего процесса замыкания)» [18]:

$$I_{k1} = I_{nt} = I_{no} \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot x_{k1} \cdot U_{\delta}}, \quad (48)$$

«Ударный ток короткого замыкания» [18]:

$$i_y^{(3)} = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I_{k1}, \quad (49)$$

где  $K_y = 1,72$  – ударный коэффициент для точки К1 [18].

«Апериодическая составляющая» [18]:

$$I_a = \sqrt{2} \cdot I_{k1} \cdot e^{-\tau/T_a}, \quad (50)$$

где « $T_a$  – постоянная времени затухания апериодической составляющей, для установок выше 1000 В  $T_a = 0,05$  с для точки К1» [18].

«Мощность КЗ ступени» [18]:

$$S_{к.ст} = \sqrt{3} \cdot U_{\delta} \cdot I_{k1}, \quad (51)$$

«Определим ток короткого замыкания в точке К2» [18]

$$X_{K2} = X_c + X_l. \quad (52)$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 7.

Таблица 7 – Расчет короткого замыкания точек К1 и К2

Параметр	Единица измерения	Величина
$U_H$	кВ	110
$S_б$	МВА	1000
$S_c$	МВА	3000
$U_б$	кВ	115
$X_c$	о.е.	0,321
$X_l$	о.е.	0,089
$X_{k1}$	о.е.	0,325
$I_{k1}$	кА	14,11
$K_y$	–	1,854
$i_{уд}$	кА	34,52
$t_{сз}$	с	0,009
$t_{св}$	с	0,11
$t$	с	0,129
$T_a$	с	0,047
$I_{at}$	кА	4,07
$S_{K,CT}$	МВА	3000
$X_{k2}$	о.е.	0,387
$I_{k2}$	кА	12,42
$K_y$	–	2,16
$i_{уд}$	кА	30,21
$t_{сз}$	с	0,007
$t_{св}$	с	0,076
$t$	с	0,105
$T_a$	с	0,048
$I_{at}$	кА	3,06
$S_{K,CT}$	МВА	2265,42

Для выбора высоковольтных выключателей главной понизительной подстанции предприятия определим, какой максимальный рабочий ток через них протекает:

$$I_{max} = \frac{1,4 \cdot S_{HT}^{rnp}}{\sqrt{3} \cdot U_H}, \quad (53)$$
$$I_{max} = \frac{1,4 \cdot 16000}{\sqrt{3} \cdot 110} = 117,57 \text{ A}$$

Ток короткого замыкания трансформатора через выключатель равен 12,42 кА. Выбираем:

- разъединитель РДЗ-2-110-1000Н УХЛ1 [12];
- «ограничитель перенапряжений ОПН У-110/73 (в питающую линию)» [18];
- «ограничитель перенапряжений ОПН–У–110/56 (в нейтраль)» [8];
- «заземлитель типа ЗОН–110М–ІУ1» [3].

Правильность выбора высоковольтного оборудования проверили по следующим параметрам:

- «по номинальному напряжению  $U_C \leq U_H$ ;
- по максимальному рабочему току  $I_{MAX} \leq I_H$ ;
- по электродинамической стойкости  $i_{уд} \leq i_{IP.CKB}$ ;
- по термической стойкости  $B_K \leq I_{TEPM.H}^2 \cdot t_{TEPM.H}$ » [18].

## 2.12 Расчет токов КЗ и выбор электрооборудования на стороне 0,4 кВ

Рассчитаем токи КЗ в точке КЗ – в электрической сети напряжением 0,4 кВ в электроцехе.

«В электрических установках, работающих при напряжении свыше 1000 В, при расчётах учитываются исключительно индуктивные сопротивления всех элементов системы электроснабжения, поскольку они оказывают решающее влияние на параметры системы. В случае же электрических установок с напряжением ниже 1000 В принимаются во внимание не только индуктивные, но и активные сопротивления некоторых элементов, которые могут существенно повлиять на общие характеристики работы системы.

Мощность короткого замыкания в точке подключения линии, питающей главную понизительную подстанцию, существенно превышает величину мощности, которая потребляется предприятием. Это позволяет сделать допущение, что периодическая составляющая тока короткого замыкания, поступающего от энергосистемы, остаётся неизменной в течение времени, что можно выразить соотношением  $I_k = I_{n.o} = I_{n.t}$ . Наиболее сложным режимом функционирования системы электроснабжения при возникновении короткого замыкания считается ситуация, когда один из трансформаторов главной понизительной подстанции выведен из работы. Это может быть вызвано необходимостью проведения профилактических или ремонтных мероприятий. При этом секционные выключатели в распределительном устройстве на напряжении 10 кВ ГПП остаются включёнными, что обеспечивает питание оставшейся нагрузки» [17]. На рисунке 4 показана расчетная схема.

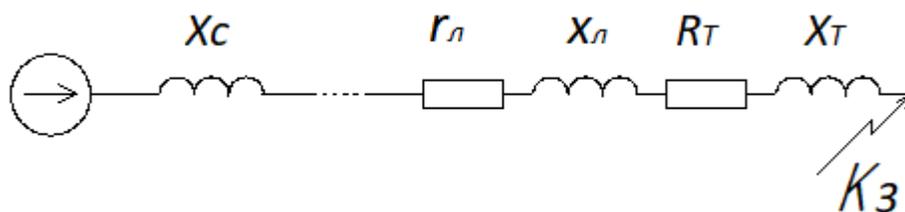


Рисунок 4 – Схема замещения для расчета КЗ в точке КЗ

«При определении тока короткого замыкания в точке КЗ в качестве источника рассматривается только энергосистема. Найдем сопротивление системы» [18]:

$$x_c = \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{к.см}}, \quad (54)$$

$$x_c = \frac{1000}{110} = 9,09 о.е.$$

«Индуктивное сопротивление трансформатора» [18]:

$$x_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{им}}, \quad (55)$$

$$x_T = \frac{6,5}{100} \cdot \frac{1000 \cdot 10^3}{400} = 162,5 о.е.$$

«Активное сопротивление трансформатора» [18]:

$$R_T = \Delta P_k \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{им}^2}, \quad (56)$$

$$R_T = 5,5 \cdot 10^3 \cdot \frac{1000}{400^2} = 34,38 о.е.$$

«Активное сопротивление линии» [18]:

$$r_L = r_{L(ГПП-ТП8)} + r_{L(ТП8-ТП3)}, \quad (57)$$

$$r_L = \frac{1,94 \cdot 0,105 \cdot 1000}{10^2} + \frac{1,94 \cdot 0,2 \cdot 1000}{10^2} = 5,37 о.е.$$

«Реактивное сопротивление линии» [18]:

$$x_L = x_{L(\Gamma\Pi\Pi-\Pi\Pi8)} + x_{L(\Pi\Pi8-\Pi\Pi3)}, \quad (58)$$
$$r_L = \frac{0.113 \cdot 0,105 \cdot 1000}{10^2} + \frac{0.113 \cdot 0,2 \cdot 1000}{10^2} = 0.31 \text{ o.e.}$$

«Эквивалентное активное сопротивление» [18]:

$$r_3 = r_T + r_L, \quad (59)$$
$$r_3 = 34,38 + 5,37 = 39,75 \text{ o.e.}$$

«Эквивалентное реактивное сопротивление» [18]:

$$x_3 = x_C + x_T + x_L, \quad (60)$$
$$x_3 = 9,06 + 162,5 + 0,31 = 171,87 \text{ o.e.}$$

«Эквивалентное сопротивление в точке К3» [18]:

$$z_3 = \sqrt{r_3^2 + x_3^2}, \quad (61)$$
$$z_3 = \sqrt{39,75^2 + 171,87^2} = 176,4 \text{ o.e.}$$

Базисный ток:

$$I_0 = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot U_H}, \quad (56)$$

$$I_{\sigma} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 1443,4 \text{ кА.}$$

Ток в точке К3:

$$I_{k3} = \frac{E_k}{z_{\sigma}} \cdot I_{\sigma}, \quad (56)$$

$$I_{k3} = \frac{1}{176,4} \cdot 1443,4 = 8,18 \text{ кА.}$$

«Ударный ток короткого замыкания в точке К3» [18]:

$$i_{y3} = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I_{k3}, \quad (49)$$

$$i_{y3} = \sqrt{2} \cdot 1,6 \cdot 8,18 = 18,5 \text{ кА.}$$

Результаты по расчету токов КЗ в таблице 8.

Таблица 8 – Расчет токов КЗ в точке К3

Расчётная точка	Напряжение, кВ	Токи, кА			Мощность кз ступени
		I <sub>по</sub>	I <sub>пт</sub>	I <sub>уд</sub>	
Точка К4	0,4	8,18	8,18	18,5	5,67

### 2.13 Электроснабжение электроцеха

В данном разделе подробно рассматривается задача, связанная с проведением расчетов для намоточного отделения №1, которое входит в состав электроцеха предприятия. Электроцех характеризуется расчетной активной

мощностью, величина которой составляет 401,34 кВт. Для его электроснабжения используется комплектная трансформаторная подстанция (КТП), которая укомплектована двумя силовыми трансформаторами марки ТМЗ–400–10/0,4.

Для распределения электроэнергии на территории цеха выбраны шинопроводы серии ШРА5. В качестве используемых моделей рассматриваются шинопроводы с разными номинальными токами: «ШРА5–250–32–IУЗ с номинальным током 250 А и ШРА5–100–32–IУЗ с номинальным током 100 А. Учитывая линейное расположение электроприемников, принято решение о применении трех распределительных шинопроводов для их питания. Шинопроводы, марки ШРА5–250–44, рассчитаны на номинальный ток 250 А, что позволяет обеспечить надежное функционирование системы. Подача электроэнергии на шинопроводы организована при помощи кабелей с медными жилами типа ВВГ, которые отличаются высокой надежностью и хорошими эксплуатационными характеристиками» [32].

«На вводе шинопроводов установлен распределительный ящик, оснащенный трехполюсным рубильником, а также комплектом предохранителей. В данном проекте использован распределительный ящик типа ЯРП 12–250. Этот ящик укомплектован рубильником марки ВР–32 и предохранителями модели ПН2–250. Такое оборудование обеспечивает надежную защиту и управление электроустановками. Крепление шинопроводов производится на колоннах цеха, при этом высота их установки составляет три метра. Питание электрических приемников осуществляется с использованием гибких медных проводов типа ПВЗ, которые прокладываются в трубах, размещенных в каналах пола» [29]. Все результаты расчетов, а также данные о применяемом оборудовании, структурированы и представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Выбор оборудования и проводов намоточного отделения

№ на плане	Наименование ЭП	п, шт	$P_{ном},$ кВт	$\cos\varphi$	$I_{ном},$ А	Тип и количество проводов (кабелей)	F, мм <sup>2</sup>	$I_{доп},$ А	Тип АВ	
1	ШР – 1	–	–	–	–	–	–	–	–	
2	станок намоточный	20	2,4	0,4	9,1	провод ПВ	4	1×2,5	25	ВА57ф35
3	электрокалорифер	1	2,8	0,5	8,5	провод ПВ	4	1×2,5	25	ВА57ф35
4	Итого по ШР – 1	21	–	–	190,5	кабель ВВГ	1	4×95	197	–
5	ШР – 2	–	–	–	–	–	–	–	–	
6	электрокалорифер	2	2,8	0,5	8,5	провод ПВ	4	1×2,5	25	ВА57ф35
7	станок оплеточный	12	0,6	0,4	2,3	провод ПВ	4	1×2,5	25	ВА57ф35
8	автомат намоточный	1	3,3	0,65	7,7	провод ПВ	4	1×2,5	25	ВА57ф35
9	станок перемоточный	3	3	0,4	11,4	провод ПВ	4	1×2,5	25	ВА57ф35
10	установка сатуроторная	2	2,2	1	3,3	провод ПВ	4	1×2,5	25	ВА57ф35
11	вентилятор	1	14	0,8	26,6	провод ПВ	4	1×4	30	ВА57ф35
12	Итого по ШР – 2	21	–	–	116,4	кабель ВВГ	1	4×50	137	–
13	ШР – 3	–	–	–	–	–	–	–	–	
14	установка испытательная	4	7,5	0,8	14,2	провод ПВ	4	1×2,5	25	ВА57ф35
15	ванна для лужения	4	10	1	15,2	провод ПВ	4	1×2,5	25	ВА57ф35
16	вентилятор	1	14	0,8	26,6	провод ПВ	4	1×4	30	ВА57ф35
17	электрокалорифер	1	2,8	0,5	8,5	провод ПВ	4	1×2,5	25	ВА57ф35
18	Итого по ШР – 3	10	–	–	153	кабель ВВГ	1	4×70	165	–

Выводы по разделу 2.

В данном разделе выполнен расчет заводских электрических нагрузок. Суммарная рассчитанная мощность составили 14784,48 кВт, общая мощность осветительной нагрузки 841,12 кВт, выполнено распределение мощностей по цеховым трансформаторным подстанциям. Получилось всего пятнадцать ТП. Выполнен расчет освещения электроцеха, по результатам которого составлен чертеж для графической части проекта. Выполнен расчет центра электрических

нагрузок, получены его координаты:  $x_0=316,7$  м,  $y_0=219,4$  м. По результатам расчета построена картограмма нагрузок, представленная в графической части проекта. Рассчитана мощность и выбраны модели трансформаторов для ТП-3, от которой питается электроцех. Приняли к установке два трансформатора ТМЗ–400/10/0,4. Для компенсации реактивной мощности вырабатываемой в электроцехе рассчитали и применили две конденсаторные батареи УКЛН–0,38–300–150 УЗ по 300 квар каждая. Рассчитали потери электроэнергии в силовых трансформаторах электроцеха, потери активной энергии составили 4,59 кВт, реактивной энергии 23,54 квар. Произведен расчет мощности трансформаторов ГПП составившая 14784,37 кВт. Выбрали в качестве основного трансформатора ТДН–16000/110/10. Для трансформатора ГПП рассчитали уставки релейных защит. Произведен расчет токов КЗ на стороне как высокого, так и низкого напряжения, с учетом которых подобрали высоковольтное оборудование ГПП и низковольтное оборудование намоточного отделения энергоцеха.

### **3 Расчет защитного заземления и молниезащиты**

#### **3.1 Расчет защитного заземления ОРУ ГПП**

«Все металлические компоненты электроустановок, которые при нормальных условиях эксплуатации не находятся под напряжением, однако могут оказаться под напряжением вследствие повреждения изоляции, должны быть обязательно заземлены с высокой степенью надежности. Такое заземление называется защитным, поскольку его основное назначение заключается в том, чтобы предотвратить возникновение опасных напряжений прикосновения, представляющих угрозу для безопасности обслуживающего персонала» [27].

«Обязательное выполнение заземления распространяется на все электроустановки с номинальным напряжением 380 В и выше, если речь идет о переменном токе. Для постоянного тока такое требование действует для электроустановок с напряжением 440 В и выше. В помещениях, которые относятся к категории повышенной опасности или особо опасных зон, а также для наружных установок заземление требуется при напряжении 42 В и выше для переменного тока. Для постоянного тока в подобных условиях заземление обязательно при уровнях напряжения от 110 В» [27].

«Элементы, подлежащие заземлению, включают корпуса электрических машин, трансформаторов, аппаратов, а также вторичные обмотки измерительных трансформаторов. Кроме того, заземлению подлежат приводы электрических аппаратов, каркасы распределительных щитов, пультов управления и шкафов. Помимо этого, обязательное заземление распространяется на металлические конструкции распределительных устройств, корпуса кабельных муфт, металлические оболочки и броню кабелей и проводов. Металлические конструкции зданий, сооружений, а также любые другие

элементы, которые конструктивно связаны с установленным электрооборудованием, также подлежат обязательному заземлению» [27].

«Для организации защитного заземления применяются как естественные заземлители, так и искусственно созданные заземляющие устройства, которые используются в зависимости от конкретных условий эксплуатации.

В качестве естественных заземлителей применяются различные конструкции и элементы. Это водопроводные трубы, металлические трубопроводы, проложенные в грунте. Исключением являются трубопроводы для транспортировки горючих жидкостей и газов. Также используются обсадные трубы скважин и металлические или железобетонные конструкции зданий, контактирующие с почвой. Дополнительно применяются металлические шпунты гидротехнических сооружений и свинцовые оболочки кабелей. Заземлителями могут быть опоры воздушных линий электропередачи (ВЛ), соединенные через грозозащитный трос с заземляющими устройствами. Рельсовые пути также используются, если между рельсами установлены перемычки» [27].

«Для повышения надежности естественные заземлители подключаются к магистральным заземляющим системам. Соединение выполняется не менее чем двумя проводниками, закрепленными в разных точках. Искусственные заземлители изготавливаются из металлических элементов. Это прутковая круглая сталь диаметром не менее 10 мм для неоцинкованной стали и 6 мм для оцинкованной. Альтернативой служит полосовая сталь толщиной не менее 4 мм с минимальным сечением 48 мм<sup>2</sup>. Количество таких заземлителей определяется расчетами. Расчеты выполняются с учетом необходимого сопротивления заземляющего устройства или допустимого уровня напряжения прикосновения» [27].

«Размещение искусственных заземлителей осуществляется так, чтобы достичь равномерного распределения электрического потенциала. Для этого на

территории открытых распределительных устройств (ОРУ) укладываются заземляющие полосы. Они размещаются вдоль рядов оборудования и в поперечном направлении на глубине 0,5–0,7 м. В результате образуется заземляющая сетка. Эта сетка подключается к заземляемому оборудованию. Для выполнения расчетов заземлителей необходимо учитывать исходные данные. Во-первых, удельное сопротивление верхнего слоя почвы составляет  $\rho_1 = 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Этот слой представляет собой почвенно-растительный слой глубиной 1,5 м. Во-вторых, удельное сопротивление нижнего слоя (глина) равно  $\rho_2 = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Ток однофазного короткого замыкания составляет  $I_{\text{кх}} = 5,98 \text{ кА}$ . Допустимое напряжение прикосновения определяется как  $U_{\text{пр}\cdot\text{доп}} = 400 \text{ В}$ . В данном случае естественные заземлители отсутствуют» [27].

«Время воздействия напряжения прикосновения человека» [13]:

$$\tau_B = t_{\text{р.з}} + t_{\text{отк.в}}, \quad (50)$$

где « $t_{\text{р.з}}$  – время действия релейной защиты, с;

$t_{\text{отк.в}}$  – время отключения выключателя, с» [13]

$$\tau_B = 0.015 + 0.05 = 0.065 \text{ с.}$$

Для  $\tau_B = 0,065 \text{ с}$  находим  $U_{\text{пр}\cdot\text{доп}} = 400 \text{ В}$

«Коэффициент, учитывающий сопротивления стекания тока на землю» [13]:

$$\beta = \frac{1000}{1000 + 1,5 \cdot \rho}, \quad (51)$$

$$\beta = \frac{1000}{1000 + 1,5 \cdot 50} = 0,93.$$

Принимаем к обустройству прямоугольную модель расположения заземлителей, показанную на рисунке 5. Тогда сторона модели:

$$\sqrt{S} = \sqrt{a \cdot b}, \quad (52)$$

где «a – ширина модели, м;

b – длина модели, м» [13]

$$\sqrt{S} = \sqrt{50 \cdot 40} = 44,7 \text{ м.}$$

«Число ячеек по стороне квадрата» [13]

$$m = \frac{L_r}{2 \cdot \sqrt{S}}, \quad (53)$$

где  $L_r = 890$  м – «суммарная длина горизонтальных заземлителей по плану» [13]

$$m = \frac{890}{2 \cdot 44,7} = 9,95 \approx 10.$$

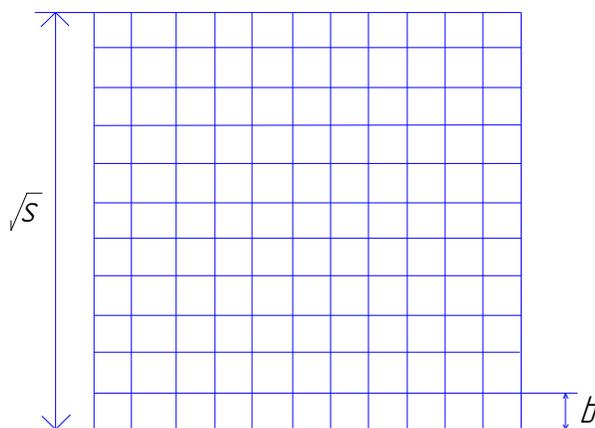


Рисунок 5 – План расположения заземления

«Длина полос в расчетной модели» [13]:

$$L'_r = 2 \cdot \sqrt{S} (m + 1), \quad (54)$$

$$L'_r = 2 \cdot 44,7(10 + 1) = 983 \text{ м}.$$

«Длина стороны ячейки» [13]:

$$b = \frac{\sqrt{S}}{m}, \quad (55)$$

$$b = \frac{44,7}{10} = 4,47 \approx 5 \text{ м}.$$

«Коэффициент напряжения прикосновения» [13]:

$$k_{\Pi} = \frac{M \cdot \beta}{\left(\frac{l_{\text{вер}} \cdot L'_r}{a \cdot \sqrt{S}}\right)^{0,45}}, \quad (56)$$

где « $M = 0,75$  при  $\rho_1/\rho_2 = 5$ ;

$l_{\text{вер}} = 5$  м – длина вертикального заземлителя;

$a = 5$  м – расстояние между вертикальными заземлителями» [13]

$$k_{\Pi} = \frac{0,75 \cdot 0,93}{\left(\frac{5 \cdot 890}{5 \cdot 44,7}\right)^{0,45}} = 0,18$$

«Число вертикальных заземлителей по периметру контура при  $a/l_{\text{в}} = 1$ » [13]:

$$n_B = \frac{\sqrt{S} \cdot 4}{l \cdot l_B}, \quad (57)$$

$$n_B = \frac{44,7 \cdot 4}{1,0 \cdot 5} = 35,8 \text{ м}.$$

Принимаем  $n_B = 36$ .

«Общая длина вертикальных заземлителей» [13]:

$$L_B = l_B \cdot n_B, \quad (58)$$

$$L_B = 5 \cdot 36 = 180 \text{ м.}$$

Относительная глубина:

$$OG = \frac{l_B + t}{\sqrt{S}}, \quad (59)$$

$$OG = \frac{5 + 0,5}{44,7} = 0,123 > 0,1$$

Тогда коэффициент А:

$$A = 0,385 - 0,25 \frac{l_B + t}{\sqrt{S}}, \quad (60)$$

$$A = 0,385 - 0,25 \frac{5 + 0,5}{44,7} = 0,354$$

Находим соотношение:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{h - t}{l_B}, \quad (61)$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{1,5 - 0,5}{5} = 0,2.$$

«По данному соотношению выбираем эквивалентное удельное сопротивление  $\rho_3 = 12,2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

Общее сопротивление сложного заземлителя» [13]:

$$R_3 = A \frac{\rho_3}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_3}{L_{\Gamma} + L_B}, \quad (62)$$

$$R_3 = 0,354 \frac{12,2}{44,7} + \frac{12,2}{983 + 180} = 0,11 \text{ Ом}$$

«Допустимое напряжение на заземлителе» [13]:

$$U_3 = \frac{U_{\text{нрдоп}}}{K_{\text{II}}}, \quad (63)$$

$$U_3 = \frac{400}{0,18} = 2222,2 \text{ В}$$

«Допустимое сопротивление заземлителя» [13]:

$$R_{3\text{доп}} = \frac{U_3}{I_k^{(1)}}, \quad (64)$$

$$R_{3\text{доп}} = \frac{2222,2}{8018} = 0,371 \text{ Ом}$$

Таким образом  $R_3 < R_{3\text{доп}}$ .

Напряжение прикосновения:

$$U_{\text{нр}} = K_{\text{II}} \cdot I_k^{(1)} \cdot R_3, \quad (65)$$

$$U_{\text{нр}} = 0,18 \cdot 8018 \cdot 0,11 = 158,7 \text{ В}.$$

Полученное значение меньше предельно возможных 400В, значит, расчет верен и окончен.

Заземляющее устройство выполняется из полосы  $40 \times 4 \text{ мм}^2$ . Произведем проверку на термическую стойкость:

$$F_{TC} = \frac{\sqrt{B_K}}{74} \leq F_{cm}, \quad (65)$$

$$B_K = (I_k^{(1)})^2 \cdot t_{отк}, \quad (66)$$

$$B_K = (8,018)^2 \cdot (0,2 + 0,05) = 16,07 \text{ кА}^2 \cdot \text{с},$$

$$F_{TC} = \frac{\sqrt{16,07}}{74} = 54 \text{ мм}^2 \leq 160 \text{ мм}^2.$$

### 3.2 Молниезащита

«Открытые распределительные устройства и подстанции, работающие на напряжениях от 20 до 500 кВ, обязательно должны быть оснащены средствами защиты от прямых ударов молнии, чтобы предотвратить повреждения оборудования и исключить аварийные ситуации. Здания закрытых распределительных устройств (ЗРУ), которые имеют металлические кровли или железобетонные несущие конструкции, защищаются путем подключения этих конструктивных элементов к заземляющим устройствам» [7].

«Мероприятия по защите от ударов молнии реализуются с использованием специализированных молниеотводов, которые предназначены для отвода разрядов. Кроме того, защиту можно обеспечить, заземлив металлические части зданий, включая крышу и другие конструкционные элементы» [7]. Если зона ОРУ не находится под защитой других высоких объектов, таких как дымовые трубы или аналогичные конструкции, то защита осуществляется посредством установки стержневых молниеотводов, которые

эффективно защищают оборудование от ударов молнии. Такой метод защиты считается наиболее простым в реализации и экономически целесообразным решением.

Размещение молниеотводов непосредственно на конструкциях ОРУ дает возможность увеличивать их высоту. Это позволяет максимально эффективно использовать зону защиты, создаваемую молниеотводами, и обеспечивает надежное прикрытие оборудования. Конструкция молниеотвода включает четыре основные части, каждая из которых выполняет свою функцию. В их состав входят несущая часть, выполняющая роль опоры, молниеприемник, который принимает разряд, токоотвод (или токопуск), обеспечивающий проводимость разряда, и заземлитель, который рассеивает электрический ток в землю.

«Для того чтобы определить наиболее подходящий тип зоны защиты и категорию молниезащиты для конкретного оборудования, необходимо выполнить расчет ожидаемого числа ударов молнии за год, используя статистические данные и параметры конструкции» [7]:

$$N = (h + h_x \cdot 6)(l + h_x \cdot 6) \cdot n \cdot 10^{-6}, \quad (67)$$

где « $h=40$  м – ширина защищаемого объекта;

$l=50$  м – длина защищаемого объекта;

$h_x=13,5$  м – высота защищаемого объекта;

$n=6$  – среднее число поражений 1 км земной поверхности в год» [14]

$$N = (40 + 13,5 \cdot 6)(50 + 13,5 \cdot 6) \cdot 6 \cdot 10^{-6} = 0,095 .$$

«Полученное количество возможных ударов молнии в землю соответствует зоне защиты – Б, категория устройств молниезащиты – 2» [14].

«Зона защиты, образуемая одиночным стержневым молниеотводом, высотой  $h$ , представляет собой конус, основание которого на земле имеет круг,

а вершина находится на определенной высоте  $h_0$ , которая, как правило, ниже максимальной высоты молниеотвода  $h_m$ , определенной для данной конструкции.

На уровне земли данная зона защиты образует круг с радиусом  $r_0$ , в то время как при подъеме вверх, на уровне защищаемого объекта на высоте  $h_x$ , горизонтальная проекция этой зоны, в силу изменения высоты, образует круг меньшего радиуса  $r_x$ , который зависит от высоты объекта и характеристик молниеотвода» [7].

«Для защиты открытых распределительных устройств (ОРУ) с напряжением 110 кВ от прямых ударов молнии используется установка отдельно стоящих стержневых молниеотводов, которые располагаются на специальных порталах подстанции для обеспечения максимальной эффективности защиты» [11].

Высота молниеотвода для данного устройства определяется с учетом различных факторов, включая тип распределительного устройства, его расположение и характеристики окружающей среды, и рассчитывается по специальному аналитическому выражению, которое учитывает все эти параметры для оптимизации защиты.

«Максимальное расстояние между молниеотводами» [14]:

$$D \leq 8(h_M - h_x), \quad (67)$$

где  $h_M$  – высота молниеотвода, м» [14];

Отсюда

$$h_M \geq \frac{D + 8 \cdot h_x}{8}, \quad (68)$$

$$h_M \geq \frac{46,1 + 8 \cdot 13,5}{8} = 19,26 \text{ м}$$

Округляем  $h_M = 19,5$  м. Тогда

$$h_0 = 0,92 \cdot h_M, \quad (69)$$

$$h_0 = 0,92 \cdot 19,5 = 17,94 \text{ м.}$$

«Зона защиты одиночного молниеотвода на уровне земли» [14]:

$$r_0 = 1,5 \cdot h_M, \quad (70)$$

$$r_0 = 1,5 \cdot 19,5 = 29,25 \text{ м.}$$

«Радиус защиты молниеотвода» [14]:

$$r_x = 1,5 \cdot \left( h_M - \frac{h_x}{0,92} \right), \quad (71)$$

$$r_x = 1,5 \cdot \left( 19,5 - \frac{13,5}{0,92} \right) = 7,24 \text{ м.}$$

«Высота молниеотвода над порталом» [14]:

$$h_a = h_M - h_x, \quad (72)$$

$$h_a = 19,5 - 13,5 = 6 \text{ м.}$$

«Наименьшая ширина защиты двух молниеотводов на высоте 13,5 м при расстоянии между молниеотводами 35 м» [14]:

$$b_{1-4} = 2 \cdot r_x \frac{7 \cdot h_a - a}{14 \cdot h_a - a}, \quad (73)$$

$$b_{1-4} = 2 \cdot 7,24 \frac{7 \cdot 6 - 35}{14 \cdot 6 - 35} = 1,88 \text{ м.}$$

Устанавливаем 4 стержневых молниеотвода, как на рисунке 6.

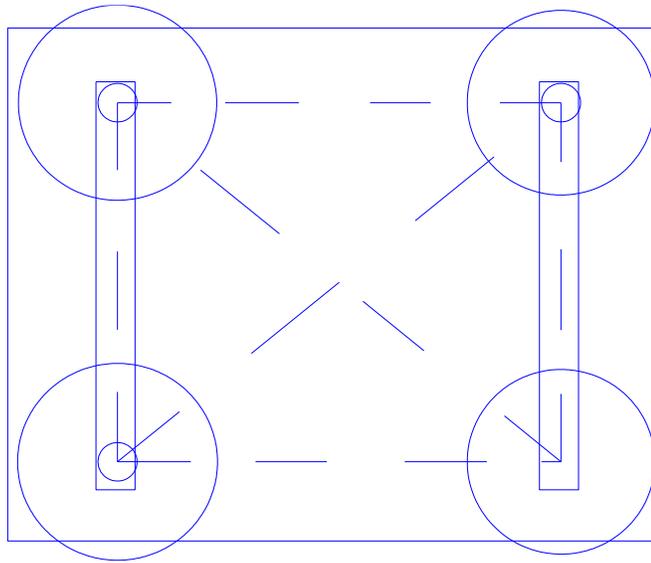


Рисунок 6 – Молниезащита ОРУ

Выводы по разделу 3.

В данном разделе рассмотрены вопросы защиты ГПП от возможного попадания молнии. В рассмотрении данного вопроса произведен расчет защитного заземления ОРУ ГПП, в результате которого определена схема расположения молниеотводов по территории подстанции и высота молниеотводов.

## Заключение

В данной выпускной квалификационной работе была подробно разработана система электроснабжения инструментального завода, включая ключевые элементы, направленные на повышение эффективности и надежности электроснабжения всего предприятия.

В рамках первого раздела проведено определение основных электрических характеристик предприятия, которое занимается выпуском инструментальной продукции, а также детальное исследование некоторых структурных подразделений, таких как электроцех и его намоточное отделение, что позволило учесть особенности их работы.

Второй раздел посвящен выполнению детального расчета электрических нагрузок завода, в ходе которого установлено, что суммарная расчетная мощность составляет 14784,48 кВт. Дополнительно была определена общая мощность осветительной нагрузки, равная 841,12 кВт, и проведено распределение нагрузок между пятнадцатью цеховыми трансформаторными подстанциями. Для электроцеха был выполнен расчет системы освещения, результаты которого были использованы для составления чертежа, включенного в графическую часть проекта. Также произведен расчет центра электрических нагрузок с определением его координат  $x_0=316,7$  м и  $y_0=219$  м, на основе которых построена картограмма нагрузок.

Рассчитана требуемая мощность и выбраны модели трансформаторов для ТП-3, питающей электроцех, где для установки выбраны два трансформатора типа ТМЗ–400/10/0,4. В целях компенсации реактивной мощности электроцеха были рассчитаны и запроектированы две конденсаторные батареи модели УКЛН–0,38–300–150 УЗ, каждая мощностью 300 квар.

Выполнен расчет потерь электроэнергии в силовых трансформаторах электроцеха: потери активной энергии составили 4,59 кВт, а реактивной энергии — 23,54 квар. Также рассчитана мощность трансформаторов главной понизительной подстанции (ГПП), составившая 14784,37 кВт. В качестве основного трансформатора для ГПП выбран ТДН–16000/110/10, который соответствует требованиям надежности и эффективности.

Для трансформатора ГПП были рассчитаны уставки релейной защиты с учетом специфики его работы. Кроме того, произведены расчеты токов короткого замыкания как на стороне высокого напряжения, так и на стороне низкого напряжения, что позволило оптимально подобрать высоковольтное оборудование для ГПП и низковольтное оборудование для намоточного отделения энергоцеха.

В третьем разделе рассмотрены аспекты защиты главной понизительной подстанции от воздействия молнии. В рамках этой задачи выполнен расчет защитного заземления открытого распределительного устройства (ОРУ) ГПП. На основе расчетов разработана схема размещения молниеотводов на территории подстанции, а также определена их оптимальная высота, что обеспечит эффективную защиту оборудования от грозových перенапряжений.

## Список используемых источников

1. АО «Новосибирский инструментальный завод» [Электронный ресурс] :  
Официальный сайт завода «НИЗ»: URL: <https://niz.ru/> (дата обращения:  
10.09.2024)
2. Газовая защита трансформаторов [Электронный ресурс] :  
Информационный ресурс «Лидер-Энерго» : URL <https://lider-energo.ru/articles/gazovaya-zashhita-transformatora> (дата обращения: 07.10.2024 г)
3. Заземлитель типа ЗОН–110М [Электронный ресурс] :  
Информационный ресурс «ЭнероПро» URL: <http://eneropro.ru/catalog/565/> (дата  
обращения: 25.09.2024 г)
4. Компенсация реактивной мощности на промышленных предприятиях  
[Электронный ресурс] : Информационный портал «Миркон» URL:  
[https://www.mircond.com/blog/kompensatsiya-reaktivnoy-moshchnosti-na-  
promyshlennykh-predpriyatiyakh/](https://www.mircond.com/blog/kompensatsiya-reaktivnoy-moshchnosti-na-promyshlennykh-predpriyatiyakh/) (дата обращения: 10.10.2024 г)
5. Максимальная токовая защита от перегрузки [Электронный ресурс] :  
Информационный ресурс «StudFiles.Net»: URL: [https://studfile.net/preview/  
5762448/page:25/](https://studfile.net/preview/5762448/page:25/) (дата обращения: 12.09.2024).
6. Микропроцессорные устройства защиты «Сириус-Т». Руководство по  
эксплуатации [Электронный ресурс] : URL  
[https://www.rza.ru/upload/iblock/f33/fqc4bjgbox111276tcsu2p47po81zp0g/Sirius\\_T.  
pdf](https://www.rza.ru/upload/iblock/f33/fqc4bjgbox111276tcsu2p47po81zp0g/Sirius_T.pdf) (дата обращения: 06.10.2024 г)
7. Молниезащита подстанций и трансформаторов [Электронный ресурс] :  
Информационный ресурс «Алеф–ЭМ» : URL  
[https://groze.net/services/molniezashchita\\_podstantsii/](https://groze.net/services/molniezashchita_podstantsii/) (дата обращения: 21.10.2024  
г)

8. Ограничитель перенапряжений ОПНп–110/56/10/500 [Электронный ресурс] : URL: <https://asenergi.com/catalog/ustrojstva-zaschity/opnp-110/opnp-110-56-10-500.html> (дата обращения: 23.09.2024 г)

9. Определение потерь в трансформаторе [Электронный ресурс] : Информационный портал «ProTransformatory.Ru» URL: <https://protransformatory.ru/raschety/poteri-v-transformatore> (дата обращения: 11.10.2024 г)

10. Основы расчета систем внутризаводского электроснабжения [Электронный ресурс] : URL: [https://portal.tpu.ru/SHARED/s/SUMAROK/educationwork/Tab1/Methodical\\_instructions.pdf](https://portal.tpu.ru/SHARED/s/SUMAROK/educationwork/Tab1/Methodical_instructions.pdf) (дата обращения: 01.09.2024)

11. Отдельно стоящие молниеотводы МОГК [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «МеталлЭнергоХолдинг» : URL <https://metatorg.ru/product-category/metallokonstruktsii/otdelno-stoyashchie-molnieotvody/otdelno-stoyashchie-molnieotvody-mogk/> (дата обращения: 04.10.2024 г)

12. Разъединитель РДЗ-2-110/1000 УХЛ1 [Электронный ресурс] : URL: <https://ueprofi.com/razyedinitel-rdz-2-110-1000ukhl1> (дата обращения: 22.09.2024 г)

13. Расчет заземляющих устройств [Электронный ресурс] : URL [https://websor.ru/normy/sistemj\\_zazemleniya/ras\\_els/http://eneropro.ru/catalog/565/](https://websor.ru/normy/sistemj_zazemleniya/ras_els/http://eneropro.ru/catalog/565/) (дата обращения: 04.10.2024 г)

14. Расчет зоны молниезащиты одиночного стержневого молниеотвода [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «ТехноСфера» : URL [https://www.ivtechno.ru/raschet\\_zonyu\\_molniezaschityu\\_odinochnogo\\_sterjnevogo\\_molnieotvoda](https://www.ivtechno.ru/raschet_zonyu_molniezaschityu_odinochnogo_sterjnevogo_molnieotvoda) (дата обращения: 04.10.2024 г)

15. Расчет МТЗ трансформатора [Электронный ресурс] : информационный ресурс «Проект РЗА»: URL: <https://pro-rza.ru/raschet-mtz-transformatora-10-0-4-kv/> (дата обращения: 15.10.2024).

16. Расчет освещенности [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Световые технологии». URL: <https://www.ltcompany.com/ru/solutions/illumination-calculator/>. (дата обращения: 01.09.2024)

17. Расчет токов коротких замыканий и замыканий на землю в распределительных сетях [Электронный ресурс] : URL: [https://www.mtrele.ru/files/project/raschet\\_ustavok/raschet\\_tokov\\_korotkih\\_zamykanij\\_i\\_zamykanij\\_na\\_zemlyu\\_v\\_raspredelitelnyh\\_setyah.pdf](https://www.mtrele.ru/files/project/raschet_ustavok/raschet_tokov_korotkih_zamykanij_i_zamykanij_na_zemlyu_v_raspredelitelnyh_setyah.pdf) (дата обращения: 08.10.2024 г)

18. Расчет токов короткого замыкания [Электронный ресурс] : URL: <https://ekfgroup.com/ru/calculators/mastertool/short-circuit> (дата обращения: 21.09.2024 г)

19. Расчет уставок ДЗТ на терминале «Сириус-Т3» [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Raschet.Info» URL: <https://raschet.info/raschet-ustavok-dzt-na-terminale-sirius-t3/> (дата обращения: 13.10.2024 г)

20. Расчет электрических нагрузок 0,4 кВ [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Studwood.Net»: URL: [https://studwood.net/2116535/matematika\\_himiya\\_fizika/raschet\\_elektricheskikh\\_nagruzok](https://studwood.net/2116535/matematika_himiya_fizika/raschet_elektricheskikh_nagruzok) (дата обращения: 12.09.2024).

21. Расчет электрических нагрузок методом упорядоченных диаграмм [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Energy-Systems». URL: <https://energy-systems.ru/main-articles/proektirovanie-elektriki/1836-raschet-jelektricheskikh-nagruzok-metodom-uporjadochennyh-diagramm> (дата обращения 17.09.2024).

22. Рекомендации по выбору компенсирующего устройства [Электронный ресурс] : Официальный сайт электротехнического завода «СлавЭнерго»: URL: <https://slavenergo.ru/ukrm> (дата обращения: 11.10.2024)

23. Силовой масляный трансформатор защищенный ТМЗ–400/10/0,4 [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «УралЭнерго». URL: <https://www.uralen.ru/catalog/trans/group-18/71.html> (дата обращения 07.10.2024).

24. Трансформатор напряжения ТОЛ–10–11 [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «ТКЭ» URL: [https://xn----7sbab3cjgicboddilid1a4l.xn--p1ai/product/tol-10-11?roistat=direct8\\_search\\_16415691354\\_%D0%A2%D0%9E%D0%9B%2010&roistat\\_referrer=none&roistat\\_pos=premium\\_1&yclid=12817055203375710207](https://xn----7sbab3cjgicboddilid1a4l.xn--p1ai/product/tol-10-11?roistat=direct8_search_16415691354_%D0%A2%D0%9E%D0%9B%2010&roistat_referrer=none&roistat_pos=premium_1&yclid=12817055203375710207) (дата обращения: 25.10.2024 г)

25. Трансформатор ТДН–16000/110–6(10) У1 [Электронный ресурс] : Информационный портал «ЭлкабТранс» URL: <https://elkabtrans.ru/catalog/tdn/tdn-16000-110-6-10-u1/> (дата обращения: 12.10.2024 г)

26. Трансформатор тока ТФЗМ–110 [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Res161» URL: <https://res161.ru/products/tf/tf-tfzm-110.php> (дата обращения: 24.10.2024 г)

27. Электрическая часть электростанций – схема расчета заземления [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Forca» : URL <https://forca.ru/knigi/arhivy/elektricheskaya-chast-elektrostantsiy-110.html> (дата обращения: 19.10.2024 г)

28. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «СибАДИ». URL: [https://portal.sibadi.org/pluginfile.php/170513/mod\\_folder/content/0/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F%2012.pdf?forcedownload=1](https://portal.sibadi.org/pluginfile.php/170513/mod_folder/content/0/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F%2012.pdf?forcedownload=1) (дата обращения 27.09.2024).

29. ЯРП-250-54 УХЛ2, с ПН-2 250А, IP54, ящик силовой (ЭТ) [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Электротехник» : URL [https://www.elektrotehnik.ru/catalog/yashchiki\\_yarp11/yarp\\_250\\_54\\_ukhl3\\_s\\_pn\\_2\\_250a\\_ip54\\_et/](https://www.elektrotehnik.ru/catalog/yashchiki_yarp11/yarp_250_54_ukhl3_s_pn_2_250a_ip54_et/) (дата обращения: 09.10.2024 г)

30. Calculating Electric Power [Electronic resource] : URL: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-2/calculating-electric-power/> (date of access: 06.10.2024 r)

31. Load centers: Fundamentals of electrical load centers [Electronic resource] : URL: <https://www.eaton.com/us/en-us/products/low-voltage-power-distribution-control-systems/loadcenters/load-center-fundamentals.html> (date of access: 09.10.2024 r)

32. Naustrial Power Engineering and Applications Handbook [Electronic resource] : URL: [https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/ADVANCED%20ENGINE%20TECHNOLOGY%20AND%20PERFORMANCE/Industrial%20Power%20Engineering%20and%20Applications%20Handbook%20\(%20PDFDrive%20\).pdf](https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/ADVANCED%20ENGINE%20TECHNOLOGY%20AND%20PERFORMANCE/Industrial%20Power%20Engineering%20and%20Applications%20Handbook%20(%20PDFDrive%20).pdf) (date of access: 14.10.2024 r)

33. Selection and application of power transformers [Electronic resource] : URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6437032> (date of access: 11.10.2024 r)

34. What is transformer gas protection [Electronic resource] : URL: <https://www.scotech-electrical.com/info/what-is-transformer-gas-protection-79379009.html> (date of access: 13.10.2024 r)