

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 корпуса по наладке и обслуживанию  
электродвигателей химического завода

Обучающийся

Е.В. Никулин

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент О.В. Самолина

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

Консультант

к.п.н., доцент А.В. Егорова

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

Тольятти 2025

## Аннотация

В данной бакалаврской работе проведена разработка проекта реконструкции системы электроснабжения корпуса по наладке и обслуживанию электродвигателей химического завода.

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

Целью бакалаврской работы является разработка проекта системы электроснабжения корпуса по наладке и обслуживанию электродвигателей (КНОЭ) химического завода. Для этого необходимо выполнить расчет электрических нагрузок (силовых и осветительных); определить число и мощности силовых трансформаторов КНОЭ, в том числе проверка их на перегрузочную способность; определение мощности компенсирующих устройств; проектирование распределительной сети КНОЭ; определение величины токов короткого замыкания; выбор и проверка коммутационной аппаратуры, токоведущих частей в распределительной сети, выбрать элементы релейной защиты, а также выполнить расчет молниезащиты и искусственного заземления.

Данная бакалаврская работа содержит пояснительную записку объемом 53 страницы, дополняемую 7 таблицами, 5 рисунками, а также 6 чертежами формата А1.

## **Abstract**

This bachelor's thesis presents the development of a reconstruction project for the power supply system of an electric motor adjustment and maintenance building at a chemical plant.

The key focus of the bachelor's thesis is the design of a power supply system with optimized parameters and the required reliability.

The objective of this bachelor's thesis is to develop a power supply system project for the electric motor adjustment and maintenance building (EMAMB) of a chemical plant. To achieve this, the following tasks were performed: calculation of electrical loads (power and lighting); determination of the number and rated power of EMAMB power transformers, including verification of their overload capacity; calculation of compensating device capacity; design of the EMAMB distribution network; determination of short-circuit currents; selection and verification of switching equipment and current-carrying components in the distribution network; selection of relay protection elements; as well as lightning protection and artificial grounding system design.

This bachelor's thesis comprises an explanatory note spanning 53 pages, supplemented by 7 tables, 5 figures, and 6 A1-format drawings

## Содержание

Введение.....	5
1 Анализ деятельности корпуса по наладке и обслуживанию электродвигателей химического завода.....	7
1.1 Применение электродвигателей на химическом предприятии, актуальность темы проекта.....	7
1.2 Краткие сведения о химическом предприятии .....	8
1.3 Заводские потребители электрической энергии .....	8
2 Проектирование системы электроснабжения корпуса по наладке и обслуживанию электродвигателей химического завода.....	11
2.1 Расчет электрических нагрузок .....	11
2.2 Расчет осветительной нагрузки КНОЭ .....	14
2.3 Расчетные электрические нагрузки КНОЭ с учетом освещения .....	16
2.4 Выбор типа, числа и мощности трансформаторов цеховой подстанции.....	17
2.5 Расчет и выбор компенсирующих устройств.....	19
2.6 Проверка трансформаторов цеховой подстанции на перегрузочную способность.....	20
2.7 Выбор кабельных линий между ТП–5 и ГПП.....	24
2.8 Расчет токов короткого замыкания на стороне 0,4 кВ.....	26
2.8 Релейная защита и автоматика .....	36
3 Расчет защитного заземления и молниезащиты .....	42
3.1 Расчет защитного заземления КНОЭ .....	42
3.2 Молниезащита .....	45
Заключение .....	48
Список используемых источников.....	49

## Введение

Главными векторами перспективного развития энергетического комплекса, предусмотренными Энергетической стратегией России на период до 2030 года являются: «снижение потерь мощности в линиях и основном оборудовании и увеличении коэффициента активной мощности, существенное обновление и модернизация действующего силового оборудования, максимально эффективное использование и расширение масштабов производства энергоресурсов, создание конкурентной рыночной среды, а также интеграция в мировую энергетическую систему» [27].

В выпускной квалификационной работе производится проектирование электроснабжения корпуса по наладке и обслуживанию электродвигателей химического комбината. Химическая промышленность относится к числу профилирующих отраслей российской индустрии. Она тесно связана с машиностроением и текстильной промышленностями, которых снабжает лаками и красками, а также общехимической продукцией производственно–технологического назначения. Поэтому выбор темы работы является актуальным.

«При проектировании электроснабжения определяющими факторами являются характеристики источников питания и потребителей электроэнергии, в первую очередь, требования к бесперебойности и надежности электроснабжения, электробезопасности и экономичности технологической части проекта» [2]. При этом в выпускной квалификационной работе сделан акцент на проектирование электроснабжения с учетом возможности роста потребления электроэнергии без коренной реконструкции сетей электроснабжения.

Объектом исследования является корпус по наладке и обслуживанию электродвигателей химического завода.

Предметом исследования является система электроснабжения корпуса, в том числе силовые питающие трансформаторы, оборудование для коммутации и защиты электрооборудования, распределительные устройства, заземление и молниезащита.

Практическая значимость состоит в разработке проекта электроснабжения, выборе силового электрического оборудования, аппаратов коммутации и защиты, кабельных линий.

Цель работы – разработать проект электроснабжения корпус по наладке и обслуживанию электродвигателей химического 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 заземления и молниезащиты» [2].

«Результатом данной работы будет являться разработанный проект электроснабжения, проверка его по различным условиям эксплуатации и критериям надежности в аварийных режимах работы» [2].

# **1 Анализ деятельности корпуса по наладке и обслуживанию электродвигателей химического завода**

## **1.1 Применение электродвигателей на химическом предприятии, актуальность темы проекта**

Электрическая энергия играет решающую роль в обеспечении жизнедеятельности химического завода. Наибольшее потребление приходится на электрооборудование насосной станции, которая содержит двигательную нагрузку как низкого, так и высокого напряжения для перекачки жидкостей. Включает в себя здание и оборудование – насосы, трубопроводы и вспомогательные устройства.

«К энергетической службе относится электроподстанция. Транспортная служба имеет в своем распоряжении галереи транспортеров, различные путевые и подъемные устройства, эстакады, разгрузочные пункты и т.д. Санитарно–техническая служба ведает отоплением, вентиляцией, водоснабжением, канализацией производственных помещений. К общезаводским относятся заводоуправление, столовая, и т.д. Склады не содержат крупных электроприемников и предназначены для хранения материалов, полуфабрикатов, готовой продукции и инструментов. Основная часть мощности в них расходуется на освещение и обогрев» [20].

Корпус по наладке и обслуживанию электродвигателей (КНОЭ) содержит различные обрабатывающие станки и предназначен для ремонта и поддержания в работоспособном состоянии собственного оборудования завода, в первую очередь электродвигателей.

## 1.2 Краткие сведения о химическом предприятии

«Химическая промышленность – одна из наиболее динамично развивающихся отраслей промышленности в нашей стране» [2]. Предприятие спроектировано на базе предприятия–аналога ФКП «Комбинат «Каменский», расположенного в г. Ростове–на–Дону.

«Предприятия данного типа являются одними из важнейших предприятий по производству специальной химической продукции» [1], а также общехимической продукции производственно–технологического назначения, такой как хлористый калий, карбокси–метилцеллюлоза (NaКМЦ), полиэфирные и пентафталевые полуфабрикатные лаки.

Химический завод состоит из 31 сооружения. «Цеха завода разделяются на основные и вспомогательные. Основные цехи работают непосредственно над созданием промышленной продукции. Вспомогательные цехи заняты обслуживанием основных цехов» [2]. «Производственные службы подразделяются на энергетические, складские, транспортные, санитарно–технические и общезаводские» [1].

## 1.3 Заводские потребители электрической энергии

Наименование цехов и структурных подразделений химического завода, а также их суммарное потребление электрической энергии представлено в таблице 1. Здесь же приведены справочные данные для низковольтных электроприемников, а именно коэффициент спроса  $K_c$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi$  и коэффициент реактивной мощности  $\operatorname{tg}\varphi$ .

Таблица 1 – Наименование потребителей, справочные и расчетные параметры низковольтных электроприемников

Наименование потребителей	Определяемые параметры			
	P <sub>н</sub> , кВт	По справочным данным		
		K <sub>с</sub>	cos φ	tg φ
1. Насосная и пожарное депо	400	0,75	0,8	0,75
2. Цех вентиляторов № 1	800	0,75	0,8	0,75
3. Надшахтное здание шахты № 1	500	0,7	0,85	0,62
4. Здание подъемных машин № 1	1600	0,7	0,85	0,62
5. Гараж	90	0,2	0,65	1,17
6. Деревообделочный цех	120	0,29	0,66	1,1
7. КНОЭ	615,4	0,75	0,3	0,85
8. Литейный цех	800	0,29	0,55	1,5
9. Склад формовочных материалов	30	0,2	0,5	1,73
10. Склад оборудования и запчастей	20	0,2	0,5	1,73
11. Склад строительных материалов	50	0,2	0,5	1,73
12. Столовая	360	0,8	0,9	0,48
13. Здание шахтного комбината	250	0,5	0,9	0,48
14. Эстакада и разгрузочный пункт сырой соли	100	0,7	0,8	0,75
15. Склад сырой соли	400	0,2	0,5	1,73
16. Галерея транспортеров № 1	700	0,4	0,8	0,75
17. Надшахтное здание шахты № 2 (солемельница)	800	0,7	0,85	0,62
18. Здание подъемных машин № 2	1000	0,7	0,85	0,62
19. Эстакада и разгрузочный пункт карнолита	400	0,7	0,8	0,75
20. Опытный флотационный цех	350	0,7	0,8	0,75
21. Цех запасных резервуаров	150	0,3	0,8	0,75
22. Главный корпус сильвинитовой фабрики	1200	0,8	0,75	0,882
23. Склад сырой соли	300	0,2	0,5	1,73
24. Цех обезвоживания	560	0,5	0,8	0,75
25. Галерея транспортеров № 2	600	0,4	0,8	0,75
26. Надшахтное здание шахты № 3	650	0,7	0,85	0,62
27. Здание подъемных машин № 3	700	0,7	0,85	0,62
28. Склад сырья	250	0,2	0,5	1,73
29. Цех защитных покрытий	160	0,5	0,8	0,75
30. Сушильный цех	520	0,7	0,8	0,75
31. Склады готовой продукции	110	0,2	0,5	1,73
Итого	13970	–	–	–

В таблице 2 приведены данные по КНОЭ.

Таблица 2 – Информация о нагрузках КНОЭ

Наименование электроприемников	Количество, шт.	P <sub>ном</sub> , кВт		K <sub>и</sub>	cosφ	tgφ
		Общая P <sub>н</sub>	Одного P <sub>мин</sub> ... P <sub>мак</sub>			
Станки универсального назначения (токарные, шлифовальные, сверлильные, фрезерные, расточные)	22	108,73	0,6...20	0,14	0,5	1,732
Специализированные станки (строгальные)	3	75,9	19,45...28,22	0,2	0,65	1,169
Вентиляторы	2	68,45	34,22	0,8	0,8	0,75
Кран мостовой	2	62,65	31,32	0,06	0,5	1,732
Преобразователи	3	48,00	14...20	0,3	0,8	0,75
Электрические печи	3	126,30	36,3...45	0,5	0,95	0,329
Сварочные агрегаты	3	125,36	41,78	0,3	0,6	1,33
Итого	38	615,38	–	0,3	0,76	0,85

Выводы по разделу 1.

В данном разделе приведены краткие сведения об использовании электричества на химическом предприятии, о назначении структурных подразделений завода, в табличном виде представлены краткие сведения и справочные параметры низковольтных потребителей электроэнергии всего завода и корпуса по наладке и обслуживанию электродвигателей.

## 2 Проектирование системы электроснабжения корпуса по наладке и обслуживанию электродвигателей химического завода

### 2.1 Расчет электрических нагрузок

Для нахождения нагрузки КНОЭ по «коэффициенту расчетной мощности следует объединить электроприемники по соответствующим категориям с одними и теми же коэффициентами использования и средневзвешенными значениями коэффициента мощности. Для каждой из этих групп рассчитать сменную активную и реактивную мощности. Расчет ведется в соответствии с РТМ 36.18.32.4–92» [3].

Расчет ведется по форме Ф636–92 [3]:

- «в колонке 1 таблицы вносятся наименования характерных групп ЭП, в соответствии классификации;
- в колонке 2 указывается общее число ЭП, приобщенных к данной группе;
- в колонке 4 значения меньшего и большего по мощности электроприемников указаны через дробь;
- значения коэффициента использования и коэффициента мощности определяются по справочным данным. Например, для группы универсальных станков в столбце 4 указывается значение  $K_{и} = 0,14$ , а значение  $\cos \varphi = 0,5$ » [3];
- «значения сменной активной и реактивной мощностей определяется для каждой группы в столбцах 7 и 8» [3] по формуле:

$$P_{см} = K_{и} \cdot P_{н}, \quad (1)$$

$$Q_{см} = P_{см} \cdot tg\varphi, \quad (2)$$

где  $P_{н}$  – «номинальная мощность ЭП (общая), кВт;

$tg\varphi$  – средневзвешенное значение коэффициента мощности» [3].

Например, «для станков универсального назначения» [3]:

$$P_{см} = 0,14 \cdot 108,73 = 15,22 \text{ кВт},$$
$$Q_{см} = 15,22 \cdot 1,732 = 26,36 \text{ квар}.$$

«Эффективное число электроприемников определяется по формуле» [3]:

$$n_э = \frac{2\Sigma P_H}{P_{H.макс}}, \quad (3)$$

где « $P_{H.макс}$  – мощность наиболее мощного электроприемника в группе, кВт» [3].

$$n_э = \frac{2 \cdot 609,54}{45} = 27,091$$

Принимаем  $n_э = 27$  шт.

«Групповой коэффициент использования вычисляется по формуле» [3]:

$$K_{и} = \frac{\Sigma P_{см}}{\Sigma P_H}, \quad (4)$$

где « $P_{см}$  – сменная мощность группы электроприемника кВт;

$P_H$  – установленная мощность группы электроприемника кВт» [3].

$$K_{и} = \frac{204,08}{615,38} = 0,3$$

Коэффициент расчетной нагрузки принимается в зависимости от  $K_{и}$  и  $n_э$  по [29]:  $K_p = 0,75$ .

Для остальных электроприемников КНОЭ расчет проводится аналогично.

«Расчетная активная мощность КНОЭ  $P_p$ , кВт» [3]:

$$P_p = K_p \cdot \sum(K_{И} \cdot P_{НОМ}), \quad (5)$$
$$P_p = 0,75 \cdot 204,08 = 153,06 \text{ кВт.}$$

«Расчетная реактивная мощность КНОЭ  $Q_p$ , квар, при  $n_3 > 10$  вычисляется по формуле» [3]:

$$Q_p = \operatorname{tg} \varphi \cdot \sum(K_{И} \cdot P_{НОМ}), \quad (6)$$
$$Q_p = 0,85 \cdot 204,08 = 173,39 \text{ квар.}$$

Полная расчетная мощность КНОЭ  $S_p$ , кВА:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}, \quad (7)$$
$$S_p = \sqrt{153,06^2 + 173,39^2} = 213,28 \text{ кВА.}$$

«Значение токовой расчетной нагрузки  $I_p$ , А, по которой выбирается сечение линии по допустимому нагреву» [3]:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_H}, \quad (8)$$
$$I_p = \frac{213,28}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 351,4 \text{ А.}$$

Результаты расчета нагрузки силовых электроприемников КНОЭ и их параметры приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Нагрузки силовых электроприемников КНОЭ

Наименование электроприемников	Количество электроприемников, шт	$P_{ном},$ кВт	Расчетные величины		$n_0 = 2 \cdot \sum P_n / P_{nmax}$	$K_p$	Расчетная мощность			Расчетный ток, А				
			$K_n \cdot P_n$	$K_n \cdot P_n \cdot tg\varphi$			активная, кВт	реактивная, кВАр	полная, кВА					
Станки универсального назначения (токарные, шлифовальные, сверлильные, фрезерные, расточные)	22	108,73	15,22	26,36	27	0,75	153,06	173,39	213,28	351,4				
Специализированные станки (строгальные)	3	75,9	15,18	17,75										
Вентиляторы	2	68,45	54,76	41,07										
Кран мостовой	2	62,65	3,76	6,51										
Преобразователи	3	48,00	14,4	10,8										
Электрические печи	3	126,30	63,15	20,76										
Сварочные агрегаты	3	125,36	37,61	50,14										
Итого	38	615,38	204,08	173,39							153,06	173,29	231,28	351,4

## 2.2 Расчет осветительной нагрузки КНОЭ

Для того чтобы «определить полные нагрузки напряжением 0,4 кВ по цехам комбината необходимо знать осветительную нагрузку, определяющуюся для каждого цеха по методу удельной мощности осветительной нагрузки на единицу площади освещаемой поверхности [24].

Для КНОЭ выбирается светодиодный подвесной светильник ДСП15 Kosmos, предназначенный для промышленных и производственных зданий. Для

используемого светильника  $\cos\varphi_0 = 0,98$ ,  $\operatorname{tg}\varphi_0 = 0,203$ . При освещенности на 100 Лк,  $P_{уд} = 2,5 \text{ Вт/м}^2$ » [5].

«Табличное значение удельной мощности,  $\text{Вт/м}^2$  корректируется на значение освещенности  $i$ » [5]

$$P_i = \frac{P_{100} \cdot E_{\text{мин}}}{E_{\text{табл}}}, \quad (9)$$

где « $P_{100}$  – значение удельной освещенности на 100 Лк;

$P_i$  – значение удельной мощности в пересчете на  $i$  Лк;

$E_{\text{мин}}$  – значение минимальной нормируемой освещенности для выбранного помещения, Лк» [15]

Для КНОЭ  $E_{\text{мин}} = 150$  Лк «при освещении светильниками ДСП» [15]:

$$P_{150} = \frac{2,5 \cdot 150}{100} = 3,75 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

«Расчетная активная мощность осветительной установки» [15]

$$P_{р.о} = \frac{F \cdot P_i}{1000}, \quad (10)$$

где « $F$  – площадь выбранного отделения, м;

$P_i$  – удельная мощность общего равномерного освещения, приведенная к  $E_{\text{мин}}$  выбранного отделения  $\text{Вт/м}^2$ » [15]

$$P_{р.о} = \frac{1344 \cdot 3,75}{1000} = 5,04 \text{ кВт}.$$

«Расчетная реактивная мощность» [15]:

$$Q_{p.o} = P_{p.o} \cdot \operatorname{tg}\varphi_o, \quad (11)$$

где « $P_{p.o}$  – расчетная активная мощность осветительной установки цеха;  
 $\operatorname{tg}\varphi_o$  – коэффициент мощности осветительной установки» [15].

$$Q_{p.o} = 5,04 \cdot 0,203 = 1,023 \text{ квар.}$$

Расчетная полная мощность находится по формуле

$$S_{p.o} = \sqrt{P_{p.o}^2 + Q_{p.o}^2}, \quad (12)$$

$$S_{p.o} = \sqrt{5,04^2 + 1,023^2} = 5,142 \text{ кВА.}$$

### 2.3 Расчетные электрические нагрузки КНОЭ с учетом освещения

«Расчетная низковольтная нагрузка каждого цеха предприятия формируется суммированием силовой и осветительной нагрузок цехов по следующей формуле» [10]

$$P_{pцi} = P_{pсi} + P_{pоi}. \quad (13)$$

Расчетная низковольтная нагрузка для КНОЭ определяется следующим образом:

$$- P_{pс.кноэ} = 153,06 \text{ кВт, } Q_{pс.кноэ} = 173,39 \text{ квар, } S_{pс.кноэ} = 213,28 \text{ кВА;}$$

$$- P_{pо.кноэ} = 5,04 \text{ кВт, } Q_{pо.кноэ} = 1,023 \text{ квар, } S_{pо.кноэ} = 5,142 \text{ кВА.}$$

Расчетная активная нагрузка для КНОЭ:

$$P_{p.кноэ} = 153,06 + 5,04 = 158,1 \text{ кВт.}$$

Расчетная реактивная нагрузка для КНОЭ:

$$Q_{p.кноэ} = 173,39 + 1,023 = 174,413 \text{ квар.}$$

Расчетная полная нагрузка для КНОЭ:

$$S_{p.кноэ} = \sqrt{158,1^2 + 174,413^2} = 235,4 \text{ кВА.}$$

## **2.4 Выбор типа, числа и мощности трансформаторов цеховой подстанции**

«По степени надежности электроснабжения и распределения между подстанциями потребителей электроэнергии до 1000 В выполнен промежуточный выбор числа и мощности трансформаторов цеховых трансформаторных подстанций (ТП).

Номинальная мощность цеховых трансформаторов рассчитывается по среднесменной потребляемой мощности за наиболее загруженную смену» [6]:

$$S_{\text{ном.Т}} = \frac{S_{\text{см}}}{K_3 \cdot n}, \quad (14)$$

где «  $S_{\text{см}}$  – средняя мощность за наиболее загруженную смену;

$K_3$  – коэффициент загрузки трансформаторов;

$n$  – число трансформаторов цеховой подстанции» [8].

Согласно [8] величина  $K_3$  может быть принята:

- « $K_3 = 0,65 - 0,7$  при преобладании нагрузок I и II категорий;
- $K_3 = 0,7 - 0,8$  при преобладании нагрузок II категории» [8];

- « $K_3 = 0,9 - 0,95$  при преобладании нагрузок II категории при наличии централизованного (складского) резерва трансформаторов, а также при нагрузках III категории при однострансформаторных подстанциях.

Расчет приводится для ТП–5. К данной ТП присоединены нагрузки цеха КНОЭ, что составляет  $S_{ркноэ} = 235,4$  кВА. Данный потребитель относится к I категории по надежности электроснабжения, на основе этого принимается количество трансформаторов  $n = 2$  и коэффициент загрузки трансформатора  $0,7$ » [8].

Расчетная мощность трансформатора  $S_{ном.т}$  вычисляется по формуле (14):

$$S_{ном.т} = \frac{235,4}{0,7 \cdot 2} = 168,36 \text{ кВА.}$$

Для установки принимаются сухие распределительные трансформаторы с системой охлаждения AF (принудительная циркуляция воздуха) типа ТСЛЗ–СЭЩ [31].

«Предварительно, без учета компенсации для ТП–5 принимается силовой трансформатор с ближайшей стандартной мощностью» [9], то есть ТСЛЗ–СЭЩ–250/10 и его данные заносим в таблицу 4.

Таблица 4 – Характеристики ТП для КНОЭ

№ цеховой подстанции	Наименование потребителей	Расчетные нагрузки			Категория потребителей	Количество трансформаторов	$K_3$	$S_{расч.т}$	$S_{ном}$
		$P_{рц},$ кВт	$Q_{рц},$ кВА	$S_{рц},$ кВА					
ТП–5	КНОЭ	158,1	174,413	235,4	I	2	0,7	168,36	250

Цеховые ТП выполнены комплектными подстанциями заводского исполнения (КТП) марки 2КТП–ПК(ТК)–СЭЩ–10/0,4 сухими распределительными трансформаторами марки ТСЛЗ–СЭЩ, «так как на предприятии некоторые цеха характеризуются агрессивной и пожароопасной средой. Кроме того, от каждой из трансформаторных подстанций питаются по несколько цехов, вследствие чего удобнее устанавливать ТП не внутри цеха, а снаружи [30].

В качестве схемы питания цеховых трансформаторных подстанций 10/0,4 используются магистральные линии от секций 10 кВ ГПП, как показано на рисунке 1. По территории завода распределительная сеть выполняется прокладкой кабелей в земле (в траншеях) и в подземных кабельных сооружениях (каналах)» [11]

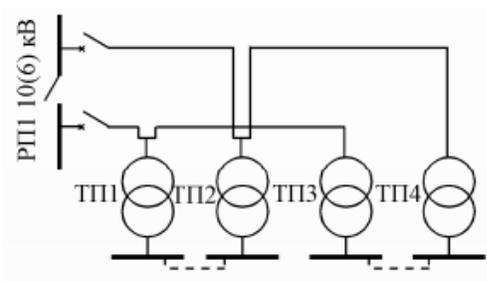


Рисунок 1 – «Схемы питания трансформаторных подстанций и электроприемников напряжением 10 кВ» [17]

## 2.5 Расчет и выбор компенсирующих устройств

«При передаче реактивной мощности из сетей 10 кВ к ЭП напряжением ниже 1000 В учитывается максимальная реактивная мощность трансформаторов, которую они способны через себя пропустить» [7]

$$Q_{max.T} = \sqrt{(N \cdot K_3 \cdot S_{ном.Т})^2 - P_{см}^2} \quad (15)$$

где «N – число трансформаторов;

$K_3$  – рекомендуемый коэффициент загрузки трансформатора;

$S_{\text{НОМТ}}$  – номинальная мощность трансформатора, кВА;

$P_{\text{см}}$  – активная мощность трансформаторов за наиболее загруженную смену» [7].

«Мощность батарей конденсаторов на стороне низкого напряжения определяется исходя из пропускной способности трансформатора» [21]:

$$Q_{\text{нк.5}} = Q_p - Q_{\text{max.T}}, \quad (16)$$

«Полученная реактивная мощность распределяется пропорционально реактивным нагрузкам между трансформаторами цеха. Для ТП–5 полученная реактивная мощность» [7]:

$$Q_{\text{max.T}} = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 250)^2 - 204,08^2} = 284,34 \text{ квар},$$

$$Q_{\text{нк.5}} = 174,413 - 284,34 = -109,9 \text{ квар}.$$

«Так как искомое значение  $Q_{\text{нк1}}$  является отрицательным, то для ТП–5 компенсация реактивной мощности не требуется» [7].

## **2.6 Проверка трансформаторов цеховой подстанции на перегрузочную способность**

«После уточнения мощности, проходящей через трансформатор, рассчитывается фактический коэффициент загрузки трансформаторов, а также

производится проверка трансформаторов на перегрузочную способность. Проверка трансформаторов ТП на систематические и аварийные перегрузки осуществляется согласно ГОСТ 14209–85 с учетом следующих условий:

- расчетная суточная продолжительность при двухсменной работе 8 часов;
- для трансформаторов, установленных в закрытых камерах, расчет производится при эквивалентной годовой температуре 10°C» [32].

«Производится расчет для двухтрансформаторной ТП № 5 по следующей формуле» [7]:

$$K_{з.факт} = \frac{S_{р.ТП}}{n \cdot S_{н.т}}, \quad (17)$$
$$K_{з.факт} = \frac{168,36}{2 \cdot 250} = 0,337.$$

«Коэффициент покрытия трансформаторами нагрузки подстанции в нормальном режиме» [7]

$$K'_{н.т.ТП-5} = \frac{S_{н.т} \cdot n}{S_{max}}, \quad (18)$$
$$K'_{н.т.ТП-5} = \frac{250 \cdot 2}{235,4} = 2,124.$$

«Так как  $K'_{н.т.ТП-5} > 1$ , то трансформатор не испытывает систематические перегрузки. Результаты расчета сведены в таблицу 5» [14].

«Проверка трансформаторов ТП на аварийную перегрузку.

Коэффициент покрытия трансформаторами нагрузки ТП № 5 в аварийном режиме находится по формуле» [7]

$$K'_{н.т.ТП-5} = \frac{S_{н.т}}{S_{max}}, \quad (19)$$

$$K'_{\text{нт.тп-5}} = \frac{250}{235,4} = 1,062.$$

Таблица 5 – Данные по ТП–5

№ подстанции	$S_p$ , кВА	$S_{\text{нт}}$ , кВА	Количество трансформаторов, n	$K_3$ факт	$K_{\text{нт}}$
ТП–5	168,36	250	2	0,337	2,124

«Так как  $K'_{\text{нт.тп-5}} > 1$ , то трансформатор не испытывает аварийные перегрузки. Согласно допустимые аварийные перегрузки для трансформаторов до 110 кВ включительно могут определяться без учета начальной загрузки, в зависимости от времени перегрузки, температуры окружающей среды и способа охлаждения трансформатора. Для трансформатора ТСЛЗ согласно допустимый коэффициент перегрузки  $K_{2\text{доп}}$  с учетом всех условий определяется по ГОСТу равным  $K_{2\text{доп}} = 1,2$ . Фактический коэффициент перегрузки  $K_{\text{ф2ав}}$ » [7]

$$K_{\text{нт.тп-5}} = \frac{S_{p.\text{max}}}{S_{\text{нт}}}, \quad (20)$$

$$K'_{\text{нт.тп-5}} = \frac{235,4}{250} = 0,941.$$

«Проверка трансформаторов осуществляется по условию» [7]

$$K_{2\text{доп}} \cdot S_{\text{нт}} \geq S_{\text{max}}, \quad (21)$$

где « $S_{\text{max}}$  – расчетная максимальная нагрузка, питающаяся от данной ТП» [7]. Для ТП № 5  $S_{\text{max}} = 235,4$  кВА.

$$1,2 \cdot 250 \text{ кВА} \geq 235,4 \text{ кВА},$$

$$300 \text{ кВА} \geq 235,4 \text{ кВА}.$$

Необходимая мощность отключения нагрузки рассчитывается по формуле

$$S_{\text{откл}} = S_{\text{доп}} - S_{\text{max}}, \quad (22)$$

$$S_{\text{откл.ТП-5}} = 300 - 235,4 = 64,6 \text{ кВА.}$$

Удельный вес потребителей третьей категории в общей нагрузке вычисляется по формуле

$$S_{\text{уд.III}} = \frac{S_{\text{III}} \cdot 100\%}{S_{\text{ТП-5}}}, \quad (23)$$

$$S_{\text{уд.III}} = \frac{84 \cdot 100\%}{250} = 33,6.$$

Производится проверка по условию

$$\frac{S_{\text{откл}} \cdot 100\%}{S_{\text{max}}} \leq S_{\text{уд.III.}\%}, \quad (24)$$

где  $S_{\text{уд.III}}$  – удельный вес потребителей 3–ей категории в общей нагрузке подстанции.

$$\frac{64,6 \cdot 100\%}{235,4} \leq 33,6\%,$$

$$27,442\% \leq 33,6\%.$$

«Условие выполняется, за счет отключения потребителей третьей категории в послеаварийном режиме трансформатор сможет нести оставшуюся нагрузку. Поэтому можно сделать вывод, что трансформатор ТП № 5 проходит проверку на аварийные перегрузки» [15].

Полученные расчетные данные вносим в таблицу 6.

Таблица 6 – Номер ТП, коэффициенты начальной и фактической нагрузки и результаты проверки ТП на перегрузочную способность

№ ТП на генплане	$K_{нт}$	$K_{2фак.}$	$K_{2доп.} \cdot S_{нт},$ кВА	$S_{откл.},$ кВА	$S_{уд.ш.},$ %	Доля отключаемой мощности в общей нагрузке ТП, %
ТП–5	1,062	0,941	300	64,6	33,6	27,442

«По результатам расчета можно сделать вывод, что выбранные трансформаторы проходят проверку на аварийную перегрузку и могут быть предложены к установке» [11]

## 2.7 Выбор кабельных линий между ТП–5 и ГПП

«Сечение кабельных линий заводской сети напряжением 10к В выбирают по нагреву длительным расчетным током по условию» [22]

$$I_{дл.доп} \leq K_1 \cdot K_2 \cdot I_{дл.доп.по ПУЭ}, \quad (25)$$

где « $k_1$  – коэффициент, учитывающий прокладку нескольких кабелей в канале (для одного кабеля в трубе  $k_1 = 1$ , для двух – 0,9, для трех – 0,85);

$k_2 = 0,92$  – поправка на четырехжильный кабель с трехжильного по ПУЭ» [22].

Расчет для кабеля от шин 10 кВ ГПП до ТП–5:

$$I_p = \frac{235,4}{1 \cdot \sqrt{3} \cdot 10,5} = 12,94 \text{ А.}$$

Принимается кабель АПвПу 3×16 с длительно допустимым током  $I'_{\text{дл.доп}} = 80$  А.

«Допустимый длительный ток кабельной линии ТП–5 – ГПП с учетом поправки вычисляются по формуле (26)» [22]:

$$I_{\text{дл.доп}} = 0,9 \cdot 0,92 \cdot 80 = 66,24 \text{ А},$$
$$12,94 \text{ А} < 66,24 \text{ А}.$$

«Выбранные кабели проверяют по току аварийного режима.

В качестве аварийного режима рассматривается следующее: если к вводному шкафу цеха питание подводится от ТП по двум кабелям, то в качестве аварии рассматривается отключение одного из них. Если же к вводному шкафу подводится питание от ТП по одному кабелю, то в качестве аварийного режима принимается перегрузка кабельной линии ( $I_{\text{дл.доп}} \geq 1,4 \cdot I_p$ )» [22].

«Так как кабель от шин 10 кВ ГПП до ТП–5 прокладывается один, то аварийный ток» [22]:

$$I_{\text{ав}} = 1,4 \cdot 12,94 = 18,116 \text{ А}.$$

«Проверка выбранного кабеля осуществляется по условию» [22]

$$I_{\text{ав}} \leq I'_{\text{дл.доп}}, \quad (26)$$
$$18,116 \text{ А} \leq 66,24 \text{ А}.$$

Условие выполняется, следовательно, выбранный кабель АПвПу 3х16 удовлетворяет условиям проверки на нагрев.

## 2.8 Расчет токов короткого замыкания на стороне 0,4 кВ

«Для определения значений токов КЗ составляется расчетная схема предприятия в однолинейном исполнении, в которую включаются генераторы (система), синхронные и асинхронные электродвигатели, влияющие на токи КЗ, а также элементы системы электроснабжения (линии, трансформаторы, реакторы), соединяющие источники электроэнергии с местом КЗ» [16]. «Расчетная схема и схема замещения представлены на рисунках 2 и 3» [17].

Принимается раздельная работа трансформаторов со стороны сборных шин и со стороны линий ВЛ.

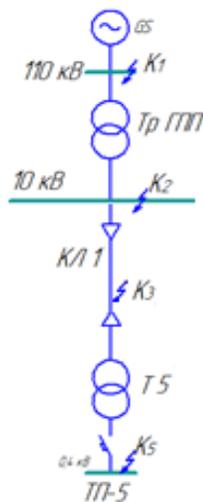


Рисунок 2 – Расчетная схема токов КЗ

«Для расчета токов КЗ на стороне ниже 1000 В все необходимые сопротивления элементов расчетной схемы приводятся к напряжению 0,4 кВ» [19]. «На ГПП установлены трансформаторы ТМГ–СЭЩ–630/10/0,4» [19].

«Индуктивное сопротивление трансформаторов ГПП, приведенное к ступени напряжения 0,4 кВ» [19]:

$$x_{ГПП}^{0,4} = x_{ГПП}^{10} \cdot \left(\frac{U_H}{U_{HT}}\right)^2, \quad (27)$$

$$x_{ГПП}^{0,4} = 1,158 \cdot \left(\frac{0,4}{10,5}\right)^2 = 1,68 \text{ мОм.}$$

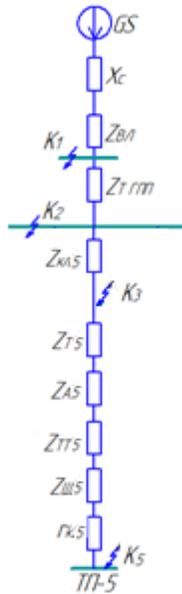


Рисунок 3 – Схема замещения

Активное сопротивление трансформаторов ГПП, приведенное к ступени напряжения 0,4 кВ рассчитывается по формуле

$$r_{ГПП}^{0,4} = r_{ГПП}^{10} \cdot \left(\frac{U_H}{U_{HT}}\right)^2, \quad (28)$$

$$r_{ГПП}^{0,4} = 0,064 \cdot \left(\frac{0,4}{10,5}\right)^2 = 0,09 \text{ мОм.}$$

Эквивалентное индуктивное сопротивление сети, приведенное к ступени напряжения 0,4 кВ определяется по формуле

$$x_c^{0,4} = \frac{U_{\text{ср.нн}}^2}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{откл.ном}} \cdot U_{\text{ср.вн}}} \cdot 10^3, \quad (29)$$

где  $U_{\text{ср.нн}} = 400$  В – «среднее номинальное напряжение сети, подключенной к обмотке НН трансформатора, В» [17];

$U_{\text{ср.вн}} = 10,5$  кВ – «среднее номинальное напряжение сети, к которой подключена обмотка высшего напряжения трансформатора, В» [17];

$I_{\text{откл.ном}} = 20$  кА – «номинальный ток отключения выключателя, установленного на стороне высшего напряжения понижающего трансформатора цепи» [17]

$$x_c^{0,4} = \frac{400^2}{\sqrt{3} \cdot 20000 \cdot 10500} \cdot 10^3 = 0,44 \text{ мОм.}$$

Согласно [19], «при расчете КЗ в сети НН активные и индуктивные сопротивления нулевой последовательности понижающих трансформаторов, обмотки которых соединены по схеме  $\Delta/Y_0$ , следует принимать равными активным и индуктивным сопротивлениям прямой последовательности» [19].

«Активное сопротивление понижающих силовых трансформаторов 10/0,4 кВ» [19]

$$r_{\text{т.кТП}} = \frac{\Delta P_{\text{кз.кТП}} \cdot U_{\text{нн.ном}}^2}{S_{\text{нт.кТП}}^2} \cdot 10^6, \quad (30)$$

где « $\Delta P_{\text{кз.кТП}} = 7,1$  кВт – потери короткого замыкания в трансформаторе;

$S_{\text{нт.кТП}} = 250$  кВА – номинальная мощность трансформатора» [19];

$U_{\text{нн.ном}} = 0,4$  кВ – «номинальное напряжение обмотки НН трансформатора, кВ» [19].

$$r_{\text{т.кТП}} = \frac{7,1 \cdot 0,4^2}{250^2} \cdot 10^6 = 2,862 \text{ мОм.}$$

«Индуктивное сопротивление понижающих силовых трансформаторов 10/0,4 вычисляется по формуле» [19]

$$x_{T.КТП} = \sqrt{(U_{кз.КТП})^2 - \left(\frac{100 \cdot \Delta P_{кз.КТП}}{S_{HT.КТП}}\right)^2} \cdot \frac{U_{HH.НОМ}^2}{S_{HT.КТП}} \cdot 10^4, \quad (31)$$

где  $\Delta U_{кз.КТП} = 6\%$  – напряжение короткого замыкания трансформатора.

$$x_{T.КТП} = \sqrt{6^2 - \left(\frac{100 \cdot 7,1}{250}\right)^2} \cdot \frac{0,4^2}{250} \cdot 10^4 = 14,697 \text{ мОм.}$$

Ток шинпровода определяется исходя из мощности понижающего трансформатора по формуле

$$I_{ШМА.КТП} = \frac{S_{HT.КТП}}{\sqrt{3} \cdot U_{HH.НОМ}}, \quad (32)$$

$$I_{ШМА.КТП} = \frac{250}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 360,8 \text{ А}$$

К установке принимается тип шинпровода ШМА4–500. Согласно [19], погонные сопротивления выбранного шинпровода  $r_{погон} = 0,030$  мОм/м,  $x_{погон} = 0,014$  мОм/м. Длина шинпровода по каталогу  $L_{ШМА} = (750+3000+1500+1500+3000+750) \cdot 10^{-3} = 10,5$  м

Активное сопротивление шинпровода находится по формуле

$$r_{ШМА.КТП} = r_{погон} \cdot L_{ШМА}, \quad (33)$$

$$r_{ШМА.КТП} = 0,03 \cdot 10,5 = 0,315 \text{ мОм.}$$

Индуктивное сопротивление шинпровода находится по формуле

$$x_{\text{шма.кТП}} = x_{\text{погон}} \cdot L_{\text{шма}}, \quad (34)$$

$$r_{\text{шма.кТП}} = 0,014 \cdot 10,5 = 0,147 \text{ мОм.}$$

Согласно [19], «активным и индуктивным сопротивлением одновитковых трансформаторов тока (на токи 500 А) при расчетах токов КЗ можно пренебречь. Поскольку  $I_{\text{шма}} = 360,8$ , то величиной активного и индуктивного сопротивления одновитковых трансформаторов тока пренебрегают, то есть  $r_{\text{ТТ}} = 0 \text{ Ом}$ » [19].

Активное сопротивление дуги за трансформатором мощностью 250 кВА,  $r_{\text{д}} = 7 \text{ мОм}$ . Активное сопротивление болтовых контактных соединений при 6 присоединениях к шинопроводу  $r_{\text{к}} = 0,003 \cdot 6 = 0,018 \text{ мОм}$ .

Начальное значение периодической составляющей максимального тока трехфазного КЗ вычисляется по формуле

$$I_{\text{по.мах}}^3 = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(r_{\text{Т.кТП}} + r_{\text{шма.кТП}} + r_{\text{к.выкл}} + r_{\text{к}})^2 + (x_{\text{окл}} + x_{\text{с}}^{0,4} + x_{\text{Т.кТП}} + x_{\text{шма.кТП}} + x_{\text{к.выкл}})^2}}, \quad (35)$$

где  $x_{\text{к.выкл}} = 0,1 \text{ мОм}$  – сопротивление контактов выключателя;

$r_{\text{к.выкл}} = 0,25 \text{ мОм}$  – сопротивление катушек выключателя;

$r_{\text{к}} = 0,018 \text{ мОм}$  – «активное сопротивление болтовых соединений»;

$x_{\text{окл}}$  – сопротивление нулевой последовательности кабельной линии

$$I_{\text{по.мах}}^3 = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(2,86 + 0,315 + 0,25 + 0,018)^2 + (3,27 \cdot 10^{-5} + 0,44 + 15 + 0,147 + 0,1)^2}} = 14,379 \text{ кА.}$$

Индуктивное сопротивление кабельной линии ГПП–ТП № 5, приведенное к ступени напряжения 0,4 кВ рассчитывается по формуле

$$x_{\text{кЛЗ}}^{0,4} = L_{\text{кЛ.ГПП-ТП5}} \cdot x_0 \cdot \left(\frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{нт}}}\right)^2, \quad (36)$$

где  $x_0$  и  $r_0$  – «удельные активное и реактивное сопротивления кабельной линии, Ом/км» [17];

$L$  – «длина воздушной линии, м» [17].

$$x_{кЛЗ}^{0,4} = 0,25 \cdot 0,09 \cdot \left(\frac{0,4}{10,5}\right)^2 = 3 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Начальное значение периодической составляющей минимального тока трехфазного короткого замыкания определяется по формуле

$$I_{no.min}^3 = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(r_{т.ктп} + r_{шма.ктп} + r_{к.выкл} + r_{к} + r_{д})^2 + (x_{окл} + x_{с}^{0,4} + x_{т.ктп} + x_{шма.ктп} + x_{к.выкл})^2}}, \quad (37)$$

$$I_{no.max}^3 = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(2,86 + 0,315 + 0,25 + 0,018 + 7)^2 + (3,27 \cdot 10^{-5} + 0,44 + 15 + 0,147 + 0,1)^2}} = 12,255 \text{ кА.}$$

«Угол сдвига по фазе напряжения или ЭДС источника рассчитывается по формуле» [17]

$$\varphi_{к5} = \arctg\left(\frac{x_{окл} + x_{с}^{0,4} + x_{т.ктп} + x_{шма.ктп} + x_{к.выкл}}{r_{т.ктп} + r_{шма.ктп} + r_{к.выкл} + r_{к}}\right), \quad (38)$$

$$\varphi_{к5} = \arctg\left(\frac{3,27 \cdot 10^{-5} + 0,44 + 15 + 0,147 + 0,1}{2,86 + 0,315 + 0,25 + 0,018}\right) = 1,355.$$

Время от начала КЗ до появления ударного тока определяется по формуле

$$t_{уд} = 0,01 \cdot \left(\frac{\pi + \varphi_{к5}}{\pi}\right), \quad (39)$$

$$t_{уд} = 0,01 \cdot \left(\frac{\pi + 1,355}{\pi}\right) = 0,00931 \text{ с.}$$

«Постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ определяется по формуле» [17]

$$T_a = \frac{X_{0кЛ} + X_c^{0,4} + X_{Т.КТП} + X_{ШМА.КТП} + X_{К.ВЫКЛ}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (r_{Т.КТП} + r_{ШМА.КТП} + r_{К.ВЫКЛ} + r_k)^2} \quad (40)$$

$$T_a = \frac{3,27 \cdot 10^{-5} + 0,44 + 15 + 0,147 + 0,1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (2,86 + 0,315 + 0,25 + 0,018)} = 0,0145 \text{ с.}$$

Ударный коэффициент для КЗ в точке К<sub>5</sub> находится по формуле

$$k_{уд} = 1 + \sin \left( \varphi_{к5} \cdot e^{\frac{-t_{уд}}{T_a}} \right), \quad (41)$$

$$k_{уд} = 1 + \sin \left( 1,355 \cdot e^{\frac{-0,00931}{0,0145}} \right) = 1,654.$$

Максимальный и минимальный ударные токи в точке К<sub>5</sub> определяется по формуле

$$i_{уд, max} = k_{уд} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{но, max}^3, \quad (42)$$

$$i_{уд, max} = 1,654 \cdot \sqrt{2} \cdot 14,38 = 33,636 \text{ кА,}$$

$$i_{уд, min} = k_{уд} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{но, min}^3, \quad (43)$$

$$i_{уд, min} = 1,654 \cdot \sqrt{2} \cdot 12,25 = 28,654 \text{ кА.}$$

«Время срабатывания выключателя отходящей линии на стороне 10 кВ вычисляется по формуле» [17]

$$t_{кз, к5} = t_b + t_{рз} + T_a, \quad (44)$$

$$t_{кз, к5} = 0,04 + 0,02 + 0,0145 = 0,075 \text{ с.}$$

Мощность короткого замыкания определяется по формуле

$$S_{кз}^3 = \sqrt{3} \cdot U_{нн} \cdot I_{но, max}^3, \quad (45)$$

$$S_{кз}^3 = \sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 14,38 = 9,963 \text{ МВА}$$

Расчет тока однофазного короткого замыкания в точке К5

Рассчитываются «параметры схемы замещения нулевой последовательности. Активные и индуктивные сопротивления нулевой последовательности понижающих трансформаторов, обмотки которых соединены по схеме  $\Delta/Y0$ , при расчете КЗ в сети НН, следует принять равными соответственно активным и индуктивным сопротивлениям прямой последовательности» [19], то есть  $r_{T0} = r_{T.кТП} = 2,86 \text{ мОм}$ ,  $x_{T0} = x_{T.кТП} = 15 \text{ мОм}$ .

По [19] «расчеты токов КЗ в электроустановках напряжением до 1 кВ следует вести с учетом индуктивных и активных сопротивлений катушек (расцепителей) максимального тока автоматических выключателей, принимая значения активных и индуктивных сопротивлений нулевой последовательности равными соответствующим сопротивлениям прямой последовательности» [19], то есть  $r_{к0в} = r_{к.выкл} = 0,25 \text{ мОм}$ ,  $x_{к0в} = x_{к.выкл} = 0,1 \text{ мОм}$ .

По ГОСТ 28249–93 погонные сопротивления для шинпровода ШМА4–500 принимаются  $r_{0.погон.шма} = 0,037 \text{ мОм/м}$ ,  $x_{0.погон.шма} = 0,042 \text{ мОм/м}$ .

Активное сопротивление нулевой последовательности шинпровода находится по формуле

$$r_{0.шма} = r_{0.погон.шма} \cdot L_{шма}, \quad (46)$$

$$r_{0.шма} = 0,037 \cdot 10,5 = 0,389 \text{ мОм}.$$

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности шинпровода находится по формуле

$$x_{0.шма} = x_{0.погон.шма} \cdot L_{шма}, \quad (47)$$

$$x_{0.шма} = 0,042 \cdot 10,5 = 0,441 \text{ мОм.}$$

Таким образом, активное сопротивление нулевой последовательности фазы шинпровода принимается ориентировочно

$$r_{0.шма} = r_{1.шма.кТП} + 3 \cdot r_{0.ш}, \quad (48)$$

$$r_{0.шма} = 0,315 + 3 \cdot 0,388 = 1,479 \text{ мОм.}$$

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности фазы шинпровода рассчитывается по формуле

$$x_{0.шма} = 4 \cdot x_{1.шма.кТП}, \quad (49)$$

$$x_{0.шма} = 4 \cdot 0,147 = 0,588 \text{ мОм.}$$

Сопротивление нулевой последовательности кабельной линии ГПП–ТП № 5 вычисляется по формуле

$$x_{0.кл} = 2,08 \cdot L_{кл.ГПП-ТП5}, \quad (50)$$

$$x_{0.кл} = 2,08 \cdot 0,25 = 0,52 \text{ мОм.}$$

Суммарное активное сопротивление нулевой последовательности определяется по формуле

$$r_{0.Σ} = r_{Т0} + r_{к.0.выкл} + r_{0.ш} + r_{к} + r_{д}, \quad (51)$$

где  $r_{к0 \text{ выкл}} = 0,25 \text{ мОм}$  – сопротивление катушек выключателя;

$r_{к0} = 0,018 \text{ мОм}$  – активное сопротивление болтовых соединений.

$$r_{0,\Sigma} = 2,86 + 0,25 + 1,479 + 0,018 + 7 = 11,607 \text{ мОм.}$$

«Суммарное индуктивное сопротивление нулевой последовательности определяется по формуле» [17]

$$x_{0,\Sigma} = x_{T0} + x_{к.0.выкл} + x_{0.ш} + x_{к}, \quad (52)$$

где  $x_{к \text{ выкл}} = 0,1 \text{ мОм}$  – «сопротивление контактов выключателя» [17];

$x_{0кл} = 0,52 \text{ мОм}$  – «сопротивление нулевой последовательности кабельной линии» [17].

$$x_{0,\Sigma} = 15 + 0,1 + 0,52 + 0,588 = 16,208 \text{ мОм.}$$

Ток однофазного КЗ без учета сопротивления дуги вычисляется по формуле

$$I_{no}^1 = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{\sqrt{(2 \cdot (r_{т.кТП} + r_{шма.кТП} + r_{к.выкл} + r_{к}) + r_{0,\Sigma})^2 + (2 \cdot (x_{с}^{0,4} + x_{т.кТП} + x_{шма.кТП} + x_{к.выкл} + x_{к}) + x_{0,\Sigma})^2}}, \quad (53)$$

$$I_{no}^1 = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{\sqrt{(2(2,86+0,315+0,25+0,018)+4,607)^2 + (2 \cdot (3,27 \cdot 10^{-5} + 0,44 + 15 + 0,147 + 0,1) + 16,208)^2}} = 14,154 \text{ кА.}$$

Ток однофазного КЗ с учетом сопротивления дуги находится по формуле

$$I_{no}^1 = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{\sqrt{(2 \cdot (r_{т.кТП} + r_{шма.кТП} + r_{к.выкл} + r_{к} + r_{д}) + r_{0,\Sigma})^2 + (2 \cdot (x_{с}^{0,4} + x_{т.кТП} + x_{шма.кТП} + x_{к.выкл} + x_{к}) + x_{0,\Sigma})^2}}, \quad (54)$$

$$I_{no}^1 = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{\sqrt{(2(2,86+0,315+0,25+0,018+7)+11,607)^2 + (2 \cdot (3,27 \cdot 10^{-5} + 0,44 + 15 + 0,147 + 0,1) + 16,208)^2}} = 12,208 \text{ кА.}$$

«Результаты расчета токов трехфазного и однофазного коротких замыканий сведены в таблицу 7» [17].

Таблица 7 – Расчетные параметры расчета точек КЗ на сторонах 110, 10 и 0,4 кВ

Расчетные параметры	К1	К2	К3	К5	
				Трехфазное КЗ	Однофазное КЗ
$U_n$ , кВ	110	10,5	10,5	0,4	
$I_k^3$ , кА	8,91	6	4,795	–	–
$I_{по(max)}$ , кА	–	–	–	14,379	14,155
$\varphi_k$	1,316	1,505	1,39	1,355	
$t_{уд}$ , с	0,00919	0,0098	0,00942	0,00931	
$T_a$ , с	0,0122	0,0486	0,0174	0,0145	
$k_{уд}$	1,581	1,943	1,724	1,654	
$i_{уд}$ , кА	19,93	16,487	11,691	33,636	
$t_{кз}$ , с	0,987	0,419	0,077	0,075	
$V_{кз}$ , кА <sup>2</sup> ·с	78,44	15,1	1,78	–	
$S_{кз}$ , МВА	1698,317	109,11	91,357	9,963	

## 2.8 Релейная защита и автоматика

«Набор релейных защит, устанавливаемых на силовых трансформаторах, зависит от мощности трансформатора и от уровня токов короткого замыкания. Понижающие трансформаторы средней мощности (одиночные трансформаторы с мощностью  $S_{ном} \geq 6300$  кВА а также параллельно работающие трансформаторы мощностью  $S_{ном} \geq 4000$  кВА), имеют следующий набор защит:

- дифференциальную защиту от междуфазных коротких замыканий с электромеханическими реле и быстронасыщающимися трансформаторами;
- газовую защиту от внутрибаковых повреждений;
- максимальную токовую защиту с пуском по напряжению от КЗ на шинах со стороны низкого напряжения и для ближнего и дальнего резервирования;
- максимальную токовую защиту от перегрузки» [33].

«Схема защиты трансформаторов показана на рисунке 4» [11].

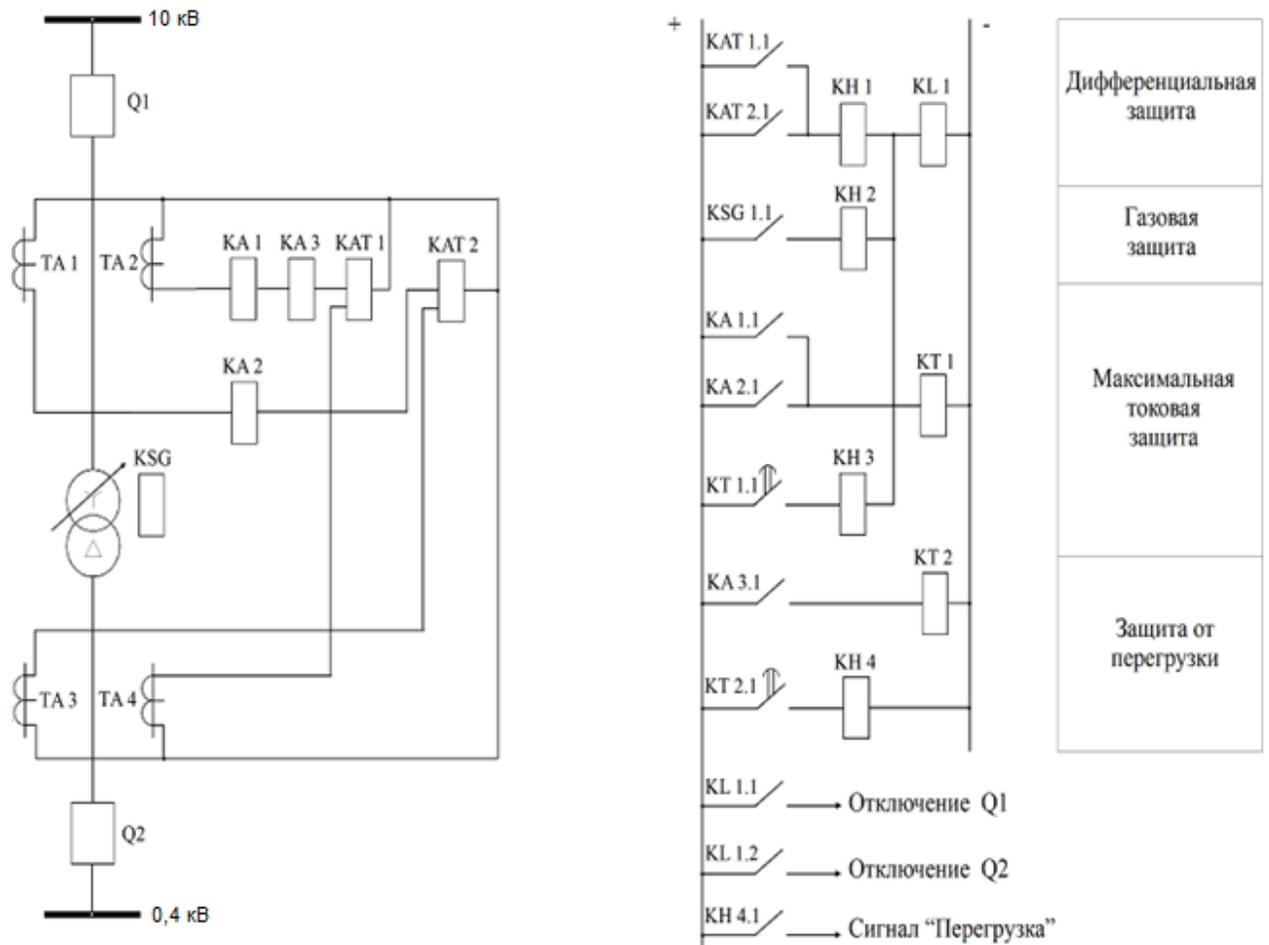


Рисунок 4 – Релейная защита трансформатора 10/0,4 кВ

Для надежной работы трансформаторов необходимо рассчитать уставки этих защит [23].

«Дифференциальная защита трансформаторов. Эта защита выполняется охватывающей одновременно и обмотки высокого напряжения, и обмотки низкого напряжения. Это приводит к ряду особенностей:

- сдвигу по фазе (обычно  $30^\circ$ ) сравниваемых токов плеч, если группы соединения обмоток силовых трансформаторов отличаются от нулевой;

- неравенству токов плеч из-за различий в токах фаз высокого и низкого напряжения и различию коэффициентов трансформации трансформаторов тока в этих фазах;
- изменению коэффициентов трансформации силового трансформатора при наличии регулирования под нагрузкой (РПН)» [19].

«Для компенсации сдвига по фазе токов плеч у трансформаторов со схемой соединения можно применить определенные методы. В частности, это включает в себя соединение трансформаторов тока, установленных на стороне силового трансформатора с соединением обмоток в Y, в треугольник, а также соединение трансформаторов тока, установленных на стороне силового трансформатора с соединением обмоток в Δ, в звезду» [8].

«Расчеты токов в плечах защиты следует проводить, учитывая коэффициент схемы. Для трансформаторов тока, соединенных в Y, этот коэффициент равен единице, а для трансформаторов тока, соединенных в Δ, коэффициент схемы составляет  $\sqrt{3}$ » [18].

Вторичный ток:

$$I_{\epsilon} = \frac{S_{ном} \cdot k_{cx}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot k_I}. \quad (55)$$

Вторичный ток для ТТ ТФЗМ–10–1У1–100/5:

$$I_{\epsilon 1} = \frac{4000 \cdot 1}{\sqrt{3} \cdot 35 \cdot 20} = 3,2 A.$$

Вторичный ток для ТТ ТЛК–10–1У3–300/5:

$$I_{\epsilon 2} = \frac{4000 \cdot \sqrt{3}}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 120} = 3,17 A.$$

«В качестве устройства дифференциальной защиты выбираем реле РНТ. С учетом выбранного реле рассчитываются параметры дифференциальной защиты» [11]:

$$k_1 = k_{отс} \cdot k_{ан} \cdot k_{одн} \cdot \frac{\epsilon\% + \Delta U\%}{100}, \quad (56)$$

$$k_1 = 1,3 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{10\% + 9\%}{100} = 0,247,$$

$$k_2 = \frac{\sqrt{3}}{2 \cdot k_{ч.треб}}, \quad (57)$$

$$k_2 = \frac{\sqrt{3}}{2 \cdot 1,5} = 0,58,$$

$$I_{к.з.*}^{(3)} = I_{к.з.}^{(3)} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}{S_{ном}}, \quad (58)$$

$$I_{к.з.*}^{(3)} = 5493 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 10,5}{4000} = 24,975 A.$$

«Определяющим для дифференциальной защиты с реле РНТ является условие отстройки тока от тока небаланса» [28]:

$$I_{сз} = k_{отс} \cdot k_{ан} \cdot k_{одн} \cdot \frac{\epsilon\% + \Delta U\%}{100} \cdot I_{к.з.}^{(3)} = k_1 \cdot I_{к.з.}^{(3)}, \quad (59)$$

$$I_{сз} = 0,247 \cdot 5493 = 1356,771 A.$$

«Токи срабатывания реле» [9]:

$$I_{cp1} = \frac{I_{c3} \cdot k_{cx}}{k_I}, \quad (60)$$

$$I_{cp1} = \frac{1356,771 \cdot 1}{20} = 67,839 A,$$

$$I_{cp2} = \frac{I_{c3} \cdot k_{cx} \cdot U_{BH}}{k_I \cdot U_{HH}}, \quad (61)$$

$$I_{cp2} = \frac{1356,771 \cdot \sqrt{3} \cdot 10}{120 \cdot 0,4} = 65,278 A.$$

«Для максимальной токовой защиты с пуском по напряжению ток срабатывания выбирается без учета перегрузки трансформатора» [9]:

$$I_{c3} = \frac{k_{отс} \cdot I_{т.ном}}{k_6}, \quad (62)$$

$$I_{т.ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}, \quad (63)$$

где  $k_{отс} = 1,2$  – коэффициент отключения;

$k_6 = 0,8$  – коэффициент возврата (для реле РТ–40)» [9];

$$I_{т.ном} = \frac{4000}{\sqrt{3} \cdot 10} = 65,983 A,$$

$$I_{c3} = \frac{1,2 \cdot 65,983}{0,8} = 98,975 A.$$

«Напряжение срабатывания минимального РН, нормально замкнутый контакт которого включен последовательно с контактом токового реле» [9]:

$$U_{cp} = \frac{(0,6 \div 0,7) U_{ном}}{k_6}, \quad (64)$$

$$U_{cp} = \frac{0,65 \cdot 10}{0,85} = 26,765 \text{кВ}.$$

«Газовая защита основана на использовании явления образования водородосодержащих газов при локальных перегревах в масле, заполняющем бак трансформатора. Перегрев возникает при междуфазных и межвитковых коротких замыканиях в обмотках и «пожаре» в стали, когда часть пластин шихтованного магнитопровода замыкается из-за нарушения изоляции между ними. Кроме того, газовая защита реагирует на снижение уровня масла. Газовое реле устанавливается в маслопроводе (трубе) между баком и расширителем» [9].

Выводы по разделу 2.

Для проектирования системы электроснабжения КНОЭ химического завода проведен расчет электрических нагрузок. Используются методики, учитывающие коэффициенты использования и мощности, что позволяет точно определить сменные активные и реактивные мощности для различных групп электроприемников. На основании расчетных нагрузок выбраны трансформаторы с учетом категории надежности электроснабжения. Трансформаторы проверены на систематические и аварийные перегрузки. Установлено, что выбранные трансформаторы соответствуют требованиям и могут работать в аварийных режимах без значительного ущерба для системы.

### 3 Расчет защитного заземления и молниезащиты

#### 3.1 Расчет защитного заземления КНОЭ

«Для того, чтобы обеспечить безопасность обслуживающего персонала, работающих на установках до 1000 В и выше, следует сооружать заземляющие устройства и заземлять металлические части электрооборудования и электроустановок. Заземление электрической установки осуществляется преднамеренным электрическим соединением с заземляющим устройством, которое представляется собой совокупность заземлителя и заземляющих проводников.

При проектировании заземляющего устройства (ЗУ) для использования одновременно в установках до и выше 1000 В с глухозаземленной нейтралью, необходимо выполнить требование ПУЭ в отношении сопротивления заземляющего устройства – оно не должно превышать 0,5 Ом. В качестве контура ЗУ применяются полосы 40х4, проложенные на глубине 0,7 м на расстоянии 3 метра от фундамента РМЦ. Тип грунта – суглинок. Климатическая зона II» [25]

«Сопротивление растеканию одиночного стержня» [25]:

$$R_{oy} = 0,292 \cdot \rho \cdot k_{\mu} = 17,52 \text{ Ом}, \quad (65)$$

где «  $k_{\mu} = 1,5$  – коэффициент, зависящий от климатической зоны для вертикального заземлителя [25];

$\rho = 40$  – удельное сопротивление грунта, Ом·м» [25].

$$R_{oy} = 0,292 \cdot 40 \cdot 1,5 = 17,52 \text{ Ом}$$

«Количество заземлителей без учета соединительных полос» [25]:

$$n = \frac{R_{0y}}{R_{3y} \cdot \eta_B}, \quad (66)$$

где « $\eta_B$  – коэффициент использования заземлителей, ориентировочно принимаем 0,48;

$R_3 = 0,5$  – сопротивление ЗУ, Ом» [25].

$$n = \frac{17,52}{0,5 \cdot 0,48} = 73 \text{ штуки.}$$

«Максимально возможное число заземлителей» [25]:

$$n = \frac{\Pi}{l}, \quad (67)$$

где « $\Pi = 2((a+6)+(b+6))$  – периметр подстанции с учетом контура ЗУ;

$a$  и  $b$  – соответственно ширина и длина подстанции;

$l$  – минимальное расстояние между электродами, Ом» [25].

$$n = \frac{2 \cdot [(68 + 6) + (31,5 + 6)]}{3} = 74,3 \text{ штуки.}$$

Принимается  $n = 74$  шт.

«Суммарное сопротивление всех вертикальных заземлителей» [25]:

$$R_B = \frac{R_{0y}}{n \cdot \eta_B}, \quad (68)$$

$$R_B = \frac{17,52}{74 \cdot 0,48} = 0,493 \text{ Ом.}$$

«Сопротивление растеканию круглого горизонтального заземлителя» [25]:

$$R_{\text{пол}} = \frac{0,366 \cdot \rho_{\text{расч}} \cdot K_M}{l \cdot \eta_{\text{пол}}} \cdot \lg \left[ \frac{2 \cdot l^2}{b \cdot t} \right], \quad (69)$$

где « $l = \Pi = 224$  м – длина горизонтальных заземлителей;

$\eta_{\text{пол}} \approx 0.24$  – коэффициент использования горизонтальных заземлителей;

$b = 0,008$  м – ширина полосы;

$t = 0,7$  м – глубина залегания горизонтальных заземлителей» [26].

$$R_{\text{пол}} = \frac{0,366 \cdot 40 \cdot 1,5}{0,24 \cdot 223} \cdot \lg \left[ \frac{2 \cdot 223^2}{0,008 \cdot 0,7} \right] = 2,975 \text{ Ом.}$$

Суммарное сопротивление ЗУ находится по формуле

$$R_{\Sigma} = \frac{R_{\text{в}} \cdot R_{\text{пол}}}{R_{\text{в}} + R_{\text{пол}}}, \quad (70)$$

$$R_{\Sigma} = \frac{0,493 \cdot 2,975}{0,493 + 2,975} = 0,48 \text{ Ом.}$$

Суммарное сопротивление ЗУ не должно превышать 0,5 Ом [12]:

$$R_{\Sigma} < R_{\text{з}}, \quad (71)$$

$$0,48 \text{ Ом} < 0,5 \text{ Ом.}$$

Условие выполняется.

Число заземлителей с учетом соединительных полос уточняется по формуле

$$n = \frac{R_{\text{оу}}}{R_{\Sigma} \cdot \eta_{\text{в}}}, \quad (72)$$

$$n = \frac{17,52}{0,423 \cdot 0,48} = 86 \text{ штук.}$$

«Расстояние между соседними вертикальными заземлителями рассчитывается по формуле» [4]

$$a = \frac{\pi}{n}, \quad (73)$$
$$a = \frac{223}{86} = 2,59 \text{ м} > 2,5 \text{ м.}$$

Рассчитанное заземляющее устройство удовлетворяет требованиям ПУЭ

### 3.2 Молниезащита

Для защиты подстанции принимаются 4-е стержневые молниеотвода,  $h = 17$  м, они расположены по углам четырехугольника: два приняты на линейных порталах, еще два – на железобетонных стойках, как показано на рисунке 5.

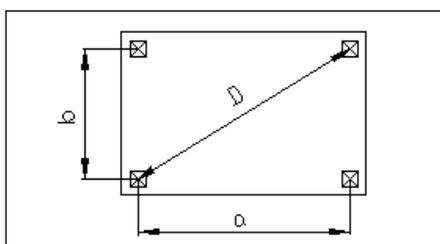


Рисунок 5 – Расположение молниеотводов на подстанции

Активную высоту молниеотвода рассчитывается по формуле

$$h_a = h - h_x, \quad (74)$$

где  $h_x = 4,42$  – высота защищаемого объекта, м.

$$h_a = 17 - 4,42 = 12,58 \text{ м.}$$

Наибольшая диагональ четырехугольника, в углах которого расположены молниеотводы:

$$D = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (75)$$

где  $a, b$  – расстояния между молниеотводами, м [13].

$$D = \sqrt{56^2 + 25^2} = 61,33 \text{ м}$$

Необходимым условием защищенности площади цеха является:

$$D \leq 8 \cdot h_a, \quad (76)$$

$$61,33 \text{ м} \leq 100,64 \text{ м}.$$

Условие защищенности здания выполняется.

Радиус зоны защиты стержневого молниеотвода находится по формуле:

$$r_x = r_0 \cdot \frac{h_0 - h_x}{h_0}, \quad (77)$$

где  $h_0 = 0,8 \cdot h = 13,6$  м – высота конуса защиты молниеотвода на уровне земли;

$r_0 = 0,8 \cdot h = 13,6$  м – радиус конуса защиты на уровне земли.

$$r_x = 13,6 \cdot \frac{13,6 - 4,42}{13,6} = 9,18 \text{ м}.$$

Расстояние от вертикальной плоскости подвески провода до границ зоны защиты рассчитывается по формуле:

$$r_x = 0,8 \cdot h'_T \cdot \frac{h'_T - h'_{xn}}{h'_T + h'_{xn}}, \quad (78)$$

где  $h'_T$  – высота подвеса троса, м;

$h'_{\text{хп}}$  – высота подвеса защищаемых проводов, м.

$$r_x = 0,8 \cdot 12,5 \cdot \frac{12,5 - 6,9}{12,5 + 6,9} = 2,887 \text{ м.}$$

Выводы по разделу 3.

Для обеспечения безопасности персонала и оборудования в КНОЭ спроектировано заземляющее устройство с использованием вертикальных и горизонтальных заземлителей. Суммарное сопротивление заземляющего устройства составляет 0,48 Ом, что соответствует требованиям ПУЭ (не более 0,5 Ом). Расчет показал необходимость установки 74 вертикальных заземлителей, что обеспечивает эффективное растекание тока и безопасность при эксплуатации электроустановок. Для защиты ГПП от молний установлены четыре стержневых молниеотвода высотой 17 метров, расположенные по углам четырехугольника. Это обеспечивает защиту здания и оборудования от прямых ударов молнии. Расчеты подтвердили, что зона защиты молниеотводов охватывает всю защищаемую площадь, что соответствует необходимым нормам безопасности. Все расчеты и проектные решения по заземлению и молниезащите соответствуют требованиям ПУЭ и обеспечивают безопасную эксплуатацию электроустановок в КНОЭ.

## Заключение

В данной работе рассмотрены вопросы проектирования электроснабжения корпуса по наладке и обслуживанию электродвигателей химического комбината.

В первом разделе приведены краткие сведения об использовании электричества на химическом предприятии, о назначении структурных подразделений завода, в табличном виде представлены краткие сведения и справочные параметры низковольтных потребителей электроэнергии всего завода и корпуса по наладке и обслуживанию электродвигателей.

Во втором разделе проведен расчет электрических нагрузок. Для этого использованы методики, учитывающие коэффициенты использования и мощности, что позволяет точно определить сменные активные и реактивные мощности для различных групп электроприемников. На основании расчетных нагрузок выбраны трансформаторы с учетом категории надежности электроснабжения. Трансформаторы проверены на систематические и аварийные перегрузки. Установлено, что выбранные трансформаторы соответствуют требованиям и могут работать в аварийных режимах без значительного ущерба для системы

Для обеспечения безопасности персонала и оборудования в КНОЭ спроектировано заземляющее устройство с использованием вертикальных и горизонтальных заземлителей. Суммарное сопротивление заземляющего устройства составляет 0,48 Ом, что соответствует требованиям ПУЭ (не более 0,5 Ом). Расчет показал необходимость установки 74 вертикальных заземлителей, что обеспечивает эффективное растекание тока и безопасность при эксплуатации электроустановок.

## Список используемых источников

1. Газовая защита трансформаторов: тяговые и трансформаторные подстанции [Электронный ресурс] : Информационный портал «Энергетика. Оборудование. Документация». URL: <https://forca.ru/knigi/arhivy/tyagovye-i-transformatornye-podstancii-40.html> (дата обращения: 07.02.2025).

2. ЗОН–110 (УЗЛ1) – заземлитель нейтрали силового трансформатора [Электронный ресурс] : официальный сайт завода «ЗЭТО». URL: <https://zeto.ru/zon-110-kv/> (дата обращения: 15.01.2025).

3. Компенсация реактивной мощности. УКРМ [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «СВЭЛ». URL: <https://svel.ru/articles/kompensatsiya-reaktivnoy-moshchnosti.html> (дата обращения: 10.02.2025).

4. Максимальная токовая защита [Электронный ресурс] : URL: <https://profsector.com/media/catalogs/58d68f339d689.pdf> (дата обращения: 12.01.2025).

5. Микропроцессорные устройства «Сириус–Т»: устройство основной защиты двухобмоточного трансформатора 6-220кВ [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «МИР Энерго». URL: [https://mirmsk.ru/sirius\\_t](https://mirmsk.ru/sirius_t) (дата обращения: 06.02.2025).

6. Молниезащита электроустановок систем электроснабжения. Учебное пособие [Электронный ресурс] : URL: [https://portal.tpu.ru/departments/kafedra/espp/literatura/Tab/M\\_Molniazazh\\_Kabishev.pdf](https://portal.tpu.ru/departments/kafedra/espp/literatura/Tab/M_Molniazazh_Kabishev.pdf) (дата обращения: 21.01.2025).

7. ОПНп–110/550/(56-88)-10-III-УХЛ-1-Полимер-Аппарат [Электронный ресурс] : Информационный портал «Энергетика. Оборудование. Документация». URL: <https://forca.ru/spravka/razryadniki-i-opn/opnp-110/550/56-88-10-iii-uhl1-polimer-apparat.html> (дата обращения: 23.01.2025).

8. Определение потерь и тока холостого хода трансформатора [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Диагностика и измерения». URL: <https://leg.co.ua/transformatory/teoriya/opredelenie-poter-i-toka-holostogo-toka-transformatora.html> (дата обращения: 11.02.2025).

9. Основы электроснабжения [Электронный ресурс] Образовательная платформа «Юрайт» URL: <https://urait.ru/book/osnovy-elektrosnabzheniya-558599> (дата обращения: 01.02.2025).

10. Отдельно стоящие молниеотводы МОГК [Электронный ресурс] : Каталог продукции «Световое Оборудование». URL: <https://svetpro.ru/brendyi/peresvet/mogk-10-vi-molnieotvodyi-granenyie-konicheskie.html> (дата обращения: 04.05.2025).

11. РДЗ–35, 110, 220 (УХЛ1) – разъединители горизонтально-поворотного типа [Электронный ресурс]: официальный сайт завода «ЗЭТО» URL: <https://zeto.ru/razyediniteli-narujnoy-ustanovki-serii-rdz-na-35-220-kv/> (дата обращения: 22.01.2025).

12. Расчет заземления для защиты электроустановок [Электронный ресурс]: Информационный ресурс «Elec.ru». URL: <https://www.elec.ru/calculators/zazemlenie/> (дата обращения: 04.02.2025).

13. Расчет молниезащиты [Электронный ресурс] : Информационный портал «МЗК Электро». URL: [https://www.mzke.ru/zona\\_molniezashhity.html](https://www.mzke.ru/zona_molniezashhity.html) (дата обращения: 04.10.2025)

14. Расчет максимальной токовой защиты трансформаторов [Электронный ресурс] : Информационный портал «Studfile.net». URL: <https://studfile.net/preview/6855045/page:4/> (дата обращения: 15.01.2025).

15. Расчет освещения по площади помещения [Электронный ресурс] : официальный сайт компании «СтройМашСервис». URL: <https://www.smsm.ru/articles/raschet-osveshcheniya/> (дата обращения: 01.03.2025).

16. Расчет токов короткого замыкания в электрических системах [Электронный ресурс]. URL: <https://nvsu.ru/ru/Intellekt/1134/Ernst%20A.D.%20Raschet%20tokov%20korotkogo%20zamikaniya%20-%20Uch.%20posobie%20-%202012.pdf> (дата обращения: 08.02.2025).

17. Расчет токов короткого замыкания в сетях переменного тока до 1 кВ [Электронный ресурс] : Информационный портал «ЕТАР Системс» URL: <https://etapr.com/raschjot-tokov-korotkogo-zamykanija-v-setyakh-do-1kv/> (дата обращения: 21.02.2025).

18. Расчет уставок для цифровых устройств релейной защиты. Часть 3. [Электронный ресурс]: Информационный ресурс «Elec.ru». URL: <https://www.elec.ru/publications/tsifrovye-tehnologii-svjaz-izmerenija/1003/> (дата обращения: 04.02.2025).

19. Расчет электрических нагрузок в системах электроснабжения АПК [Электронный ресурс] : URL: <https://kubsau.ru/upload/iblock/9c8/9c84fdd278d8a5fe88fff572e33f466a.pdf> (дата обращения: 12.01.2025).

20. Расчет электрических нагрузок промышленных предприятий [Электронный ресурс] : URL: [https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/6088/Raschet\\_ehlektricheskih\\_nagruzok\\_promyshlennyh\\_predpriyatij.pdf?sequence=1](https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/6088/Raschet_ehlektricheskih_nagruzok_promyshlennyh_predpriyatij.pdf?sequence=1) (дата обращения 17.01.2025).

21. Рекомендации по выбору компенсирующего устройства [Электронный ресурс] : URL: [https://lipetsk-kiparis.narod.ru/HTD/Soft/ispytaniya/coder/raschet\\_condera.pdf](https://lipetsk-kiparis.narod.ru/HTD/Soft/ispytaniya/coder/raschet_condera.pdf) (дата обращения: 11.02.2025).

22. ТМЗ–400/10/0,4 Рустрэнс: трансформатор масляный боковой [Электронный ресурс] : Информационный портал «Новые Технологии». URL: <https://rustrans.nt-rt.ru/price/product/109808> (дата обращения: 07.02.2025).

23. Трансформаторы тока опорные серии ТОЛ–10–11 [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Tdtransformator.ru». URL: <https://www.tdtransformator.ru/transformatory-izmeritelnye/transformatory-toka/tol-10-11-transformatory-toka-opornye/> (дата обращения: 25.02.2025).

24. Трансформатор ТДН–16000/110–6(10) У1: силовой, двухобмоточный, трехфазный, классом напряжения 110 кВ [Электронный ресурс] : URL: <https://powertrans.nt-rt.ru/images/manuals/tdn-16000-110.pdf> (дата обращения: 12.02.2025).

25. Трансформатор тока ТФЗМ 110Б IV1 [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Elec.ru». URL: <https://www.elec.ru/viewer?url=/files/127/000000628/attfile/tehniceskoe-opisanie-transformatorov-toka-tfzm-110-b-i-u1.pdf> (дата обращения: 04.02.2025)

26. Электроснабжение. 14. Заземляющие устройства [Электронный ресурс] : URL: <http://www.kgau.ru/distance/2013/et2/007/gl14.htm> (дата обращения: 19.01.2025).

27. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений [Электронный ресурс] : Информационный портал «Знаниум». URL: <https://znaniyum.ru/catalog/document?id=431007> (дата обращения: 27.01.2025).

28. ЯРП–250–54: ящик силовой с рубильником и предохранителями [Электронный ресурс] : Информационный портал «Вам Свет». URL: [https://www.vamsvet.ru/catalog/product/yashchik\\_s\\_rubilnikom\\_i\\_predokhranitelya\\_mi\\_yarp\\_250a\\_na\\_dva\\_napravleniya\\_u1\\_ip54\\_iek\\_yarp\\_250\\_2\\_54/](https://www.vamsvet.ru/catalog/product/yashchik_s_rubilnikom_i_predokhranitelya_mi_yarp_250a_na_dva_napravleniya_u1_ip54_iek_yarp_250_2_54/) (дата обращения: 09.12.2025).

29. Calculating Electric Power [Electronic resource]. URL: <https://gcsephysicsninja.com/lessons/energy-power/electricity-meter-reading-calculation/> (date of access: 06.02.2025).

30. Load centers: Fundamentals of electrical load centers [Electronic resource]  
. URL: <https://www.thespruce.com/electrical-panel-load-center-1824958> (date of access: 09.02.2025).

31. Naustrial Power Engineering and Applications Handbook [Electronic resource]. URL:  
<https://www.wesleyanargus.com/Resources/u41613/2371973/industrialpowerengineer-ingandapplicationshandbook.pdf> (date of access: 14.01.2025).

32. Selection and application of power transformers [Electronic resource].  
URL: [https://farady-electric.com/news\\_detail/276052.html](https://farady-electric.com/news_detail/276052.html) (date of access: 11.02.2025).

33. What is transformer gas protection [Electronic resource]. URL:  
<https://electricaltopic.com/safety-of-oil-transformer.html> (date of access: 13.02.2025).