

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 электроснабжения термического участка ООО «Тольяттинский судоремонтный завод»

Обучающийся

А.А. Прохорова

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., О.В. Самолина

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

Тольятти 2024

Аннотация

Настоящая выпускная квалификационная работа посвящена разработке и внедрению системы электроснабжения для термического участка ООО «Тольяттинский судоремонтный завод». Надежное и бесперебойное электроснабжение является важнейшим элементом для обеспечения эффективной работы производственных процессов, особенно на участках, связанных с термообработкой металлов, таких как закалка, отжиг и цементация. В условиях растущих требований к энергоэффективности и безопасности производства возникает необходимость модернизации существующих систем электроснабжения, что позволит снизить затраты на эксплуатацию и повысить надежность работы оборудования.

Целью работы является разработка энергоэффективной и безопасной системы электроснабжения для термического участка.

Для достижения данной цели в работе были поставлены следующие задачи:

- анализ исходных данных и теоретических основ электроснабжения;
- расчет электрических нагрузок;
- выбор трансформаторных подстанций с учетом компенсации реактивной мощности;
- подбор оборудования и систем релейной защиты;
- проектирование системы заземления и молниезащиты.

В результате проведенного исследования предложены технические решения по оптимизации схемы электроснабжения, что позволит повысить надежность и экономичность работы оборудования, а также снизить эксплуатационные издержки. Разработанные рекомендации могут быть применены для модернизации аналогичных производственных объектов.

Содержание

Введение	4
1 Анализ исходных данных на выполнение работы	6
2 Расчет электрических нагрузок предприятия	8
3 Выбор и расчет числа и мощности трансформаторов	16
4 Расчет токов короткого замыкания	18
5 Выбор и расчет электрических аппаратов и проводников	28
6 Выбор основного электрооборудования и его проверка	33
7 Расчет релейной защиты и автоматики	35
8 Расчет заземления и молниезащиты	42
Заключение	46
Список используемых источников	47

Введение

Судостроение представляет собой одну из стратегически значимых отраслей промышленности Российской Федерации, оказывая значительное влияние на обеспечение национальной безопасности, развитие транспортной инфраструктуры и укрепление экономического потенциала страны. В условиях возрастающей конкуренции на мировом рынке, российские судостроительные предприятия стремятся повышать производительность и качество своей продукции. Одним из ключевых аспектов обеспечения эффективной работы судостроительных заводов является организация надежного электроснабжения, что особенно актуально для энергоемких участков производства, таких как термические цеха.

Термическая обработка металлов, включающая такие процессы, как отжиг, закалка и цементация, требует значительных энергозатрат и стабильного электроснабжения. Для реализации данных процессов необходимо использование высококачественного электрооборудования, обеспечивающего бесперебойную работу цехов и высокую степень безопасности персонала. Проблема энергоснабжения в судостроительной отрасли становится всё более актуальной, особенно в условиях необходимости соблюдения строгих экологических стандартов и повышения энергоэффективности.

Целью данной выпускной квалификационной работы является разработка системы электроснабжения для термического участка ООО «Тольяттинский судоремонтный завод», отвечающей современным требованиям по надежности, безопасности и энергоэффективности. В рамках работы необходимо решить следующие задачи: провести анализ исходных данных по электропотреблению предприятия, выполнить расчет электрических нагрузок, подобрать трансформаторные подстанции и другое электрооборудование, а также разработать систему релейной защиты и молниезащиты. Особое внимание будет уделено выбору оборудования с

учетом компенсации реактивной мощности, что позволит снизить эксплуатационные расходы и повысить экономическую эффективность проекта.

Для достижения поставленных целей использовались методы анализа и расчета на основе нормативных документов [6], а также специализированное программное обеспечение для проектирования электрических систем. Применение комплексного подхода к проектированию позволит не только обеспечить стабильное энергоснабжение цеха, но и повысить его энергоэффективность за счет использования современных технологий и оптимизации нагрузки на сеть.

Практическая значимость проекта заключается в том, что предложенные технические решения могут быть использованы не только для модернизации существующих судостроительных предприятий, но и для проектирования новых объектов промышленного производства. Разработанная система электроснабжения обеспечит высокую степень надежности и безопасности при минимальных затратах на эксплуатацию и обслуживание оборудования, что позволит повысить конкурентоспособность предприятия на отечественном и международном рынках.

1 Анализ исходных данных на выполнение работы

В современном судостроении предъявляются высокие требования к надежности и эффективности производственных процессов, особенно на участках, где проводится термообработка металлических деталей. Для обеспечения стабильной и бесперебойной работы производственного оборудования критически важно проектирование и внедрение надежной системы электроснабжения. Учитывая это, основной задачей данного проекта является создание системы электроснабжения для термического участка ООО «Тольяттинский судоремонтный завод», которая должна соответствовать современным стандартам в области энергоэффективности и безопасности.

Проектируемая система должна обеспечить надежное энергоснабжение для широкого спектра технологического оборудования, задействованного на участке, включая печи для отжига, закалки и цементации, а также различное металлообрабатывающее оборудование. Все указанные процессы требуют значительных энергетических ресурсов, что предъявляет особые требования к стабильности и качеству подаваемой электроэнергии.

Для достижения поставленных целей необходимо провести тщательный анализ исходных данных, касающихся существующих условий электроснабжения и особенностей работы оборудования на данном участке.

Основные потребители электроэнергии подразделяются на три группы в зависимости от характера их работы:

- приемники, работающие в режиме с продолжительно неизменной или мало меняющейся нагрузкой;
- приемники, работающие в режиме кратковременной нагрузки;
- приемники, работающие в режиме повторно-кратковременной нагрузки.

Это разделение позволяет более точно рассчитывать электрические нагрузки и выбирать соответствующее оборудование.

На термическом участке выполняются следующие технологические операции: отжиг, нормализация, цементация, закалка с использованием высокочастотных печей, а также различные виды отпуска металлов.

Каждая из этих операций требует точного соблюдения температурных режимов и высокого уровня надежности электроснабжения для предотвращения сбоев в работе оборудования и выхода его из строя.

В таблице 1 приведены исходные технические данные термического участка ООО «Тольяттинский судоремонтный завод».

Таблица 1 – Исходные технические данные термического участка ООО «Тольяттинский судоремонтный завод»

Наименование электроприемника	Количество	Рэп., кВт	cosφ
Печь сопротивления	3	4	0,5/1,73
Станок фрезерный	2	8,5	0,5/1,73
Станок радиально-сверлильный	6	9	0,5/1,73
Пресс кривошипный	3	10	0,65/1,16
Пресс фрикционный	3	12	0,65/1,16
Вертикально-намоточный станок	3	15	0,5/1,73
Штамповочный автомат	3	12,5	0,65/1,16
Станок шлифовальный	4	9,5	0,65/1,16
Штамп фасонный	2	3,2	0,65/1,16
Печь индукционная	3	11,5	0,65/1,16
Вентиляционная установка	2	48	0,8/0,75
Кран-балка	2	25	0,5/1,73
Заточный станок	3	3	0,65

Выводы по разделу. В данном разделе были собраны все необходимые данные, что позволит избежать недостатка информации при выполнении работы. Исходные данные соответствуют поставленным целям и задачам, что позволяет уверенно двигаться к их достижению. Идентификация необходимых ресурсов и рисков позволит оптимально распределить усилия и минимизировать потенциальные проблемы. Полученная информация станет основой для дальнейшего планирования и разработки стратегии выполнения работ, что увеличит эффективность процессов.

2 Расчет электрических нагрузок предприятия

Эффективное функционирование любого производственного предприятия, особенно такого энергоемкого, как судоремонтный завод, невозможно без предварительного точного расчета электрических нагрузок. Расчет нагрузок позволяет определить потребности объекта в электроэнергии, выбрать оптимальные параметры оборудования и обеспечить надежность работы всех систем электроснабжения.

В процессе работы термического участка используются различные электроприемники, которые подразделяются по режимам их работы. Эти устройства отличаются по характеру потребляемой мощности и длительности нагрузки, что требует индивидуального подхода к расчету. Например, такие приемники, как высокочастотные печи, работающие на закалке и цементации металлов, нуждаются в высокой стабильности энергоснабжения для поддержания заданных температурных режимов. С другой стороны, оборудование с кратковременными нагрузками, включая подъемные механизмы или прессы, имеет другой профиль потребления энергии, что также необходимо учитывать.

Основная задача данного раздела – определить электрические нагрузки, возникающие на исследуемом объекте, и обосновать выбор оборудования, которое обеспечит стабильную работу всех технологических процессов. «При этом особое внимание уделяется учету коэффициентов использования электроприемников, режимов их работы, а также распределению нагрузок по фазам для минимизации потерь и повышения энергоэффективности» [21].

«Расчет электрических нагрузок, который сводится к определению максимальных (P_M, Q_M, S_M) расчетных нагрузок группы электроприёмников:

$$P_M = K_M \cdot P_{CM}, \quad (1)$$

где P_M – максимальная активная нагрузка, кВт;

K_M – коэффициент максимума активной нагрузки;

$P_{см}$ – средняя активная мощность за наиболее нагруженную смену, кВт» [1].

«Максимальная реактивная нагрузка:

$$Q_M = K'_M \cdot Q_{см}, \quad (2)$$

где Q_M – максимальная реактивная нагрузка, квар;

K'_M – коэффициент максимума реактивной нагрузки;

$Q_{см}$ – средняя реактивная мощность за наиболее нагруженную смену, квар» [9].

«Максимальная полная нагрузка:

$$S_M = \sqrt{P_M^2 + Q_M^2}, \quad (3)$$

где S_M – максимальная полная нагрузка, кВА» [10].

«Средняя активная мощность за наиболее нагруженную смену:

$$P_{см} = K_{и} \cdot P_{н}, \quad (4)$$

где $K_{и}$ – коэффициент использования электроприемников, определяется на основании опыта эксплуатации;

$P_{н}$ – номинальная активная групповая мощность, приведенная к длительному режиму, без учета резервных электроприемников, кВт» [12].

«Средняя реактивная мощность за наиболее нагруженную смену:

$$Q_{см} = P_{см} \cdot tg\varphi, \quad (5)$$

где $Q_{см}$ – средняя реактивная мощность за наиболее нагруженную смену, квар;

$tg\varphi$ – коэффициент реактивной мощности» [11].

«Коэффициент максимума активной мощности:

$$K_M = 1 + \frac{1,5}{\sqrt{n_э}} \sqrt{\frac{1-K_{и.ср}}{K_{и.ср}}}, \quad (6)$$

где $n_э$ – эффективное число электроприемников;

$K_{и.ср}$ – средний коэффициент использования группы электроприемников» [16].

«Средний коэффициент использования группы электроприемников:

$$K_{и.ср} = \frac{P_{см.Σ}}{P_{н.Σ}}, \quad (7)$$

где $P_{см.Σ}$, $P_{н.Σ}$ – суммы активных мощностей за смену и номинальных в группе электроприемников, кВт» [17].

«Эффективное число электроприемников:

$$n_э = F(n, m, K_{и.ср}, P_n), \quad (8)$$

где n – фактическое число электроприемников в группе;

m – показатель силовой сборки в группе» [19].

«Показатель силовой сборки в группе:

$$m = \frac{P_{н.нб}}{P_{н.нм}}, \quad (9)$$

где $P_{н.нб}$, $P_{н.нм}$ – номинальные приведенные к длительному режиму активные мощности электроприемников наибольшего и наименьшего в группе, кВт» [18].

$K'_M=1,1$ при n_{Δ} меньше или равно 10.

«Величина равномерности:

$$H = \frac{P_{\phi.\text{нб}} - P_{\phi.\text{нм}}}{P_{\phi.\text{нм}}} \cdot 100\%, \quad (10)$$

где $P_{\phi.\text{нб}}$, $P_{\phi.\text{нм}}$ – мощность наиболее и наименее загруженной фазы, кВт» [22].

«При H больше 15% и включении на фазное напряжение:

$$P_y^{(3)} = 3P_{\text{м.ф}}^{(1)}, \quad (11)$$

где $P_y^{(3)}$ – условная 3-фазная мощность (приведенная), кВт;

$P_{\text{м.ф}}^{(1)}$ – мощность наиболее загруженной фазы, кВт» [21].

При H больше 15% и включении на линейное напряжение.

Для одного электроприемника:

$$P_y^{(3)} = \sqrt{3P_{\text{м.ф}}^{(1)}}. \quad (12)$$

Для нескольких электроприемников:

$$P_y^{(3)} = 3P_{\text{м.ф}}^{(1)}. \quad (13)$$

Потери мощности в трансформаторе:

$$\Delta P = 0,02 \cdot S_{\text{нн}}, \quad (14)$$

$$\Delta Q = 0,1 \cdot S_{\text{нн}}, \quad (15)$$

$$\Delta S = \sqrt{\Delta P^2 + \Delta Q^2}, \quad (16)$$

$$S_{\text{вн}} = S_{\text{нн}} + \Delta S. \quad (17)$$

Схема включения однофазных нагрузок приведена на рисунке 1.

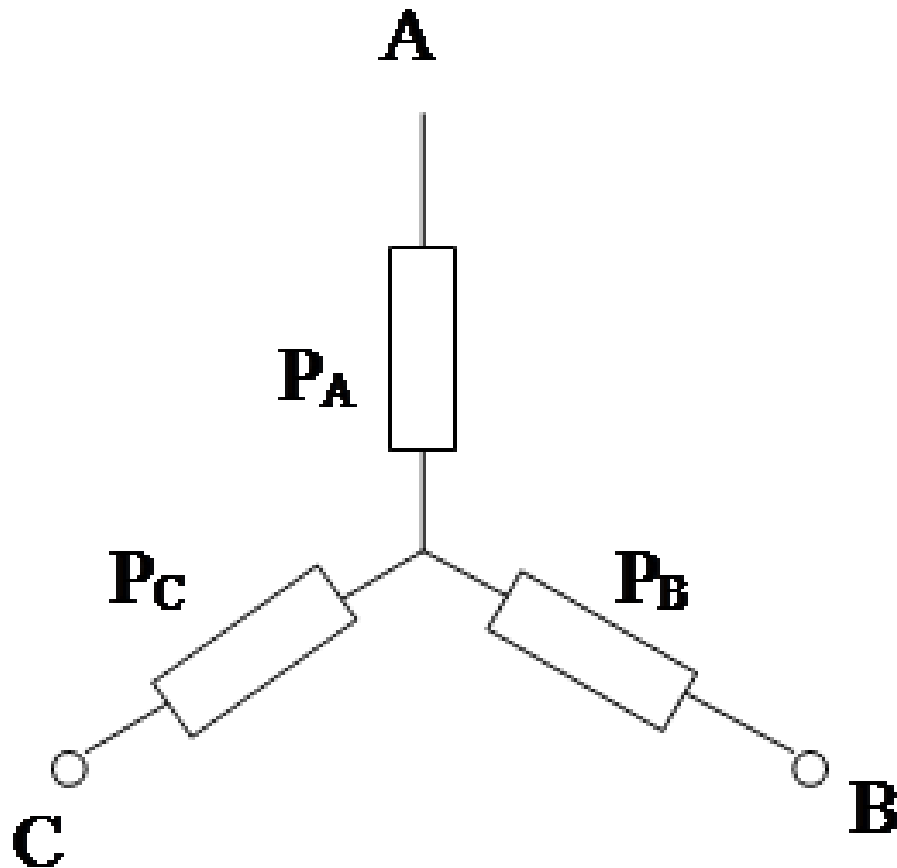


Рисунок 1 – Схема включения однофазных нагрузок

Расчет электрических нагрузок приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Расчет электрических нагрузок

Наименование РУ и электроприемников	Нагрузка установленная						m	Сменная нагрузка			n_{Σ}	K_M	K'_M	Максимальная нагрузка			
	P_n , кВт	η	$P_n \Sigma$, кВт	K_N	$\cos \varphi$	$tg \varphi$		$P_{см}$, кВт	$Q_{см}$, квар	$S_{см}$, кВА				P_M , кВт	Q_M , квар	S_M , кВА	I_M , А
РП1																	
Вентиляторы	48	2	96	0,65	0,8	0,75	-	62,4	46,8	-	-	-	-	-	-	-	-
Всего по РП1	-	2	96	0,65	-	-	-	62,4	46,8	78	-	-	-	62,4	46,8	78	118,7
РП2																	
Пресс кривошипный	10/6,3	3	18,9	0,3	0,65	1,17	-	5,67	6,63	-	-	-	-	-	-	-	-
Всего по РП2	-	3	18,9	0,3	-	-	-	5,67	6,63	8,7	-	-	-	5,67	6,63	8,7	13,2
ЩРА1																	
Пресс фрикционный	12	3	36	0,25	0,65	1,17	-	9	10,53	-	-	-	-	-	-	-	-
Вертикально- намоточный станок	15	3	45	0,23	0,65	1,17	-	10,35	12,1	-	-	-	-	-	-	-	-
Печь сопротивления	4	3	12	0,25	0,65	1,17	-	3	3,51	-	-	-	-	-	-	-	-
Всего по ЩРА1	-	9	93	0,24	-	-	>3	22,35	26,14	34,4	12,4	1,758	1,0	39,29	26,14	47,19	71,7
ЩРА2																	
Заточный станок 1Ф	3	3	18,6	0,17	0,45	1,98	-	3,16	6,3	-	-	-	-	-	-	-	-
Штамп фасонный	3,2	2	18,6	0,17	0,45	1,98	-	3,16	6,3	-	-	-	-	-	-	-	-
Станок радиально- сверлильный	9	6	54	0,22	0,65	1,17	-	11,88	13,9	-	-	-	-	-	-	-	-
Станок фрезерный	8,5	2	17	0,25	0,65	1,17	-	4,25	4,97	-	-	-	-	-	-	-	-
Кран балка ПВ=60%	25/19,4	1	19,4	0,35	0,45	1,98	-	6,79	13,4	-	-	-	-	-	-	-	-
Всего по ЩРА2	-	14	109	0,239	-	-	>3	26,1	38,61	46,6	11,2	1,8	1,0	47	38,61	60,83	92,5

Продолжение таблицы 2

Наименование РУ и электроприемников	Нагрузка установленная						m	Сменная нагрузка			n_3	K_M	K'_M	Максимальная нагрузка			
	P_n , кВт	η	$P_{n\Sigma}$, кВт	K_N	$\cos\varphi$	$tg\varphi$		P_{cm} , кВт	Q_{cm} , квар	S_{cm} , кВА				P_M , кВт	Q_M , квар	S_M , кВА	I_M , А
ЩРАЗ																	
Штамповочный автомат	12,5	3	37,5	0,25	0,65	1,17	-	3,38	10,97	-	-	-	-	-	-	-	-
Станок шлифовальный	9,5	4	38	0,22	0,65	1,17	-	8,36	9,78	-	-	-	-	-	-	-	-
Печь индукционная	11,5	3	34,5	0,22	0,25	1,17	-	7,59	8,88	-	-	-	-	-	-	-	-
Кран- балка ПВ=60%	25/19,4	1	19,4	0,35	0,45	1,98	-	6,79	13,4	-	-	-	-	-	-	-	-
Всего по ЩРАЗ	-	11	129,4	0,201	-	-	<3	26,12	43,03	50,3	11	1,9	1	49,63	43,03	65,8	99,9
Освещение																	
$P_{дл}$	4,3	-	4,3	0,85	0,95	0,33	-	3,66	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-
$P_{лм}$	13,3	-	13,3	0,85	1	0	-	11,3	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Итого по ОУ	-	-	17,6	0,85	-	-	-	14,96	1,2	15	-	-	-	14,96	1,2	15	22,7
Итого по цеху	-	-	-	-	0,805	0,7355	-	-	-	-	-	-	-	220,8	228,6	319,35	491,3

Выводы по разделу. В данном разделе проведен анализ электрических нагрузок термического участка судоремонтного завода, что позволило учесть специфику работы различных групп электроприемников и их влияние на энергопотребление. Определены установленная, сменная и максимальные нагрузки по судоремонтному заводу в целом. Полученные данные обеспечивают основу для дальнейшего выбора оборудования и проектирования системы электроснабжения, способной обеспечить стабильное и эффективное функционирование всех технологических процессов. Обеспечение стабильного и эффективного энергоснабжения всегда является одной из главных задач при проектировании электроснабжения. Особое внимание уделено учету коэффициентов использования и максимальных нагрузок, что позволяет минимизировать потери энергии и оптимизировать эксплуатационные расходы предприятия.

3 Выбор и расчет числа и мощности трансформаторов

Одним из ключевых элементов системы электроснабжения является трансформаторное оборудование, обеспечивающее преобразование напряжения для надежного питания потребителей. Правильный выбор трансформаторов играет важную роль в обеспечении устойчивой работы предприятия, так как позволяет не только удовлетворить текущие потребности в электроэнергии, но и создать резерв для возможного увеличения нагрузок в будущем.

В процессе проектирования трансформаторной подстанции необходимо учитывать ряд факторов: характер нагрузки, график электропотребления, коэффициенты мощности и возможность компенсации реактивной энергии. Кроме того, важным аспектом является минимизация потерь энергии в трансформаторе, что напрямую влияет на экономическую эффективность системы.

Для определения оптимального числа и мощности трансформаторов производится анализ нагрузок на каждом этапе работы подстанции. При этом особое внимание уделяется учету режимов максимальной и минимальной нагрузок, а также требований по надежности электроснабжения при аварийных ситуациях. Подбор трансформаторов осуществляется с учетом нормативных документов, регулирующих работу электроустановок.

«Расчетная мощность компенсирующей установки (КУ):

$$Q_{кр} = \alpha \cdot P_M (tg\varphi - tg\varphi_k), \quad (18)$$

где $Q_{кр}$ – расчетная мощность КУ, квар;

$\alpha=0,9$ – коэффициент, учитывающий повышение естественным способом;

$tg\varphi, tg\varphi_k$ – коэффициент реактивной мощности до и после компенсации» [7].

Расчетная мощность КУ:

$$Q_{кр} = 0,9 \cdot 220,8 \cdot (0,7355 - 0,3287) = 80,83 \text{ квар.}$$

Результаты всех расчетов сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Сводная ведомость нагрузок

Параметр	$\cos\varphi$	$tg\varphi$	P_M , кВт	Q_M , квар	S_M , кВА
Всего на НН без КУ	0,805	0,7355	220,8	228,6	319,35
КУ	-	-	-	1×80	-
Всего на НН с КУ	0,949	0,3325	220,8	88,6	239
Потери	-	-	4,7	23,9	24,1
Всего на ВН с КУ	-	-	227,5	112,8	254

«Расчетная мощность трансформатора с учетом потерь

$$S_p = 0,7 \cdot s, \quad (19)$$

$$\Delta P_T = 0,02 \cdot S_{НН}, \quad (20)$$

$$\Delta Q_{Тр} = 0,1 \cdot S_{НН}, \quad (21)$$

$$\Delta S_T = \sqrt{\Delta P_T^2 + \Delta Q_T^2} \text{ [22]}. \quad (22)$$

$$S_p = 0,7 \cdot 254 = 178 \text{ кВА,}$$

$$\Delta P_T = 0,02 \cdot 235,7 = 4,7 \text{ кВт,}$$

$$\Delta Q_{Тр} = 0,1 \cdot 235,7 = 23,8 \text{ квар,}$$

$$\Delta S_T = \sqrt{4,7^2 + 23,6^2} = 24,1 \text{ кВА.}$$

По результатам расчетов был выбран трансформатор типа ТМ.

Выводы по разделу. В данном разделе выполнен расчет оптимального числа и мощности трансформаторов, произведен анализ нагрузок на каждом этапе работы подстанции, выбор трансформатора типа ТМ для обеспечения надежного электроснабжения термического участка.

4 Расчет токов короткого замыкания

Обеспечение безопасной и надежной работы системы электроснабжения невозможно без тщательного анализа возможных аварийных режимов, включая короткие замыкания. Расчет токов короткого замыкания позволяет оценить максимальные нагрузки на оборудование и разработать эффективные меры защиты, минимизирующие последствия аварийных ситуаций.

Токи короткого замыкания возникают при нарушении изоляции, повреждении кабелей или неисправности оборудования. Их величина зависит от параметров системы, включая сопротивление линий, мощность источников питания и характеристики трансформаторов. Знание этих параметров необходимо для выбора аппаратов защиты, способных оперативно отключить поврежденные участки сети, сохранив работоспособность остальных элементов.

Для определения токов короткого замыкания (КЗ) используются соотношения из [14].

«3-фазного тока короткого замыкания, кА:

$$I_{\text{к}}^{(3)} = \frac{V_{\text{к}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\text{к}}}, \quad (23)$$

где $V_{\text{к}}$ – линейное напряжение в точке короткого замыкания, кВ;

$Z_{\text{к}}$ – полное сопротивление до точки короткого замыкания, Ом» [22].

2-фазного тока короткого замыкания, кА:

$$I_{\text{к}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\text{к}}^{(3)} = 0,87 \cdot I_{\text{к}}^{(3)}. \quad (24)$$

«1-фазного тока короткого замыкания, кА:

$$I_K^{(1)} = \frac{V_{\text{кф}}}{Z_n + \frac{Z_T^{(1)}}{3}} \quad (25)$$

где $V_{\text{кф}}$ – фазное напряжение в точке короткого замыкания, кВ;

Z_n – полное сопротивление петли «фаза-нуль» до точки короткого замыкания, Ом;

$Z_T^{(1)}$ – полное сопротивление трансформатора однофазному короткому замыканию, Ом» [22].

«Ударный ток короткого замыкания, кА» [14]:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I_K^{(3)}, \quad (26)$$

где « K_y – ударный коэффициент» [23].

$$K_y = F \cdot \left(\frac{R_K}{X_K} \right). \quad (26)$$

«Действующее значение ударного тока короткого замыкания, кА» [14]:

$$I_y = q \cdot I_K^{(3)}, \quad (27)$$

где « q – коэффициент действующего значения ударного тока» [23].

$$q = \sqrt{1 + 2(K_y - 1)^2}. \quad (28)$$

«Для силовых трансформаторов:

$$R_T = \Delta P_K \cdot \left(\frac{V_{\text{нн}}}{S_T} \right)^2 \cdot 10^6, \quad (29)$$

$$Z_T = u_K \cdot \frac{V_{\text{нн}}^2}{S_T} \cdot 10^4, \quad (30)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}, \quad (31)$$

где ΔP_K – потери мощности короткого замыкания, кВт;

ΔP_K – напряжение короткого замыкания, %;

U_{HH} – линейное напряжение обмотки НН, кВ;

S_T – полная мощность трансформатора, кВА» [4].

«Для линий ЭСН кабельных, воздушных и шинопроводов» [9]:

$$R_L = r_0 \cdot L_L, \quad (32)$$

$$X_L = x_0 \cdot L_L, \quad (33)$$

где « r_0 и x_0 – удельные активное и индуктивное сопротивления, мОм/м;

L_L – протяженность линии, м» [14].

«Удельное активное сопротивление» [9]:

$$r_0 = \frac{10^3}{\gamma \cdot S}, \quad (34)$$

где « S – сечение проводника мм²;

γ – удельная проводимость материала, м/(Ом·мм²)» [12].

«При расчете 1-фазных токов КЗ значения удельных индуктивных сопротивлений петли «фаза-нуль» принимается равным 0,4 мОм/м - для изолированных открыто проложенных проводов» [14].

«Сопротивления элементов на ВН приводятся к НН» [11]:

$$R_{HH} = R_{ВН} \cdot \left(\frac{V_{HH}}{V_{ВН}}\right)^2, \quad (35)$$

$$X_{HH} = X_{ВН} \cdot \left(\frac{V_{HH}}{V_{ВН}}\right)^2, \quad (36)$$

где « R_{HH} и X_{HH} – сопротивления, приведенные к НН, мОм;

$R_{ВН}$ и $X_{ВН}$ – сопротивления, на ВН, МОм;

$V_{ВН}$ и $V_{НН}$ – напряжения высокое и низкое, кВ» [10].

$$\ll R_c = 0,92 \cdot 14 \cdot \frac{6,3^2}{37^2} + 1,24 \cdot 0,9 \cdot \frac{0,4^2}{6,3^2} = 0,0006 \text{ Ом},$$

$$X_c = 1,185 \cdot \frac{0,4^2}{6,3^2} = 0,0075 \text{ Ом},$$

$$R_T = 9,4 \text{ МОм},$$

$$X_T = 27,2 \text{ МОм},$$

$$R_{к.1 \text{ ступ}} = 15 \text{ МОм},$$

$$R_a = 0,15 \text{ МОм},$$

$$X_a = 0,17 \text{ МОм},$$

$$R_{к.пер.3 \times 185} = 0,021 \cdot 4 = 0,84 \text{ МОм},$$

$$R_{Т.Т.} = 0,11 \text{ МОм},$$

$$X_{Т.Т.} = 0,17 \text{ МОм},$$

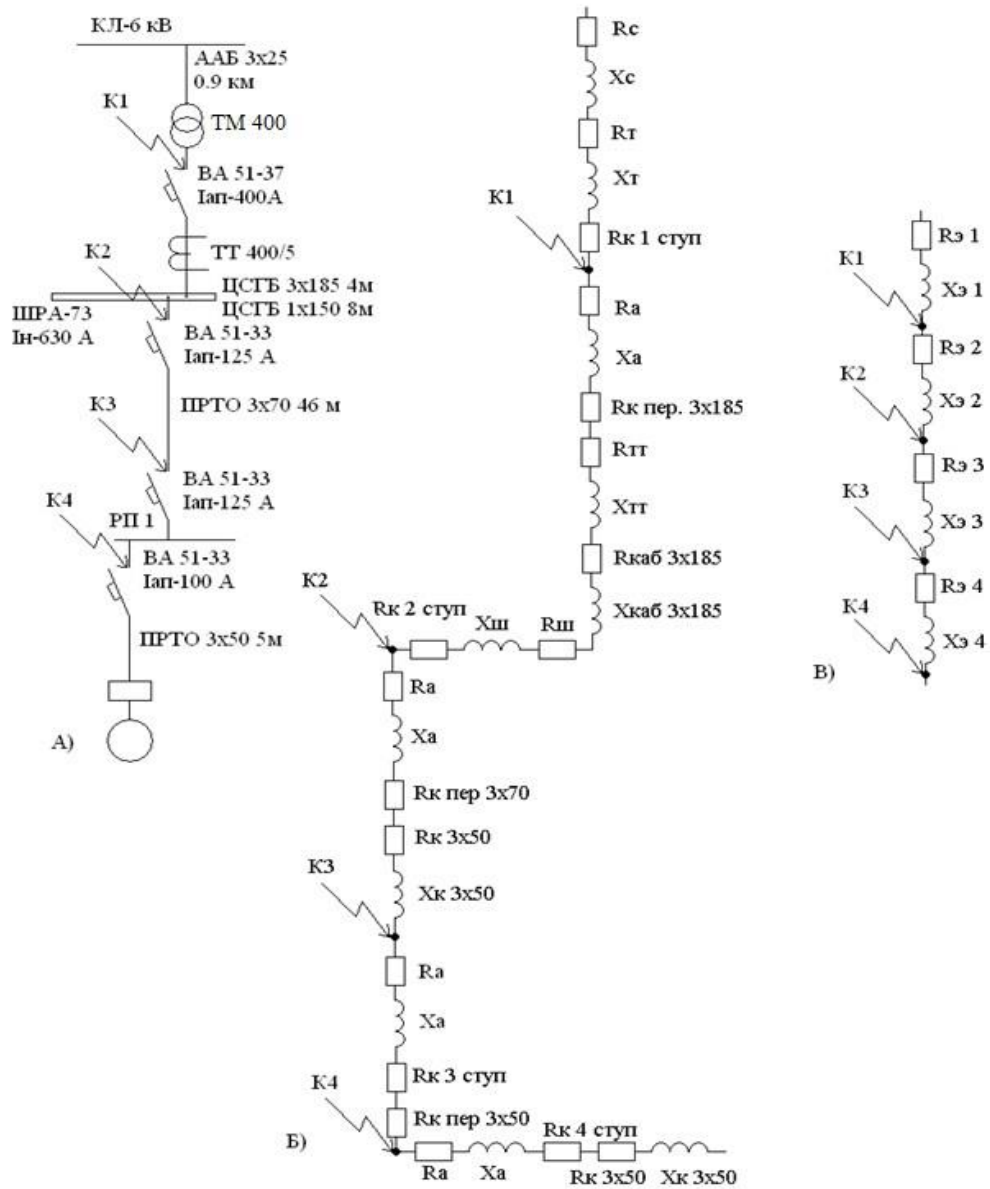
$$R_{каб} = 0,1 \cdot 4 = 0,4 \text{ МОм},$$

$$X_{каб} = 0,0596 \cdot 4 = 0,2384 \text{ МОм},$$

$$R_{ш} = 0,1 \cdot 1,6 = 0,16 \text{ МОм},$$

$$X_{ш} = 0,13 \cdot 1,6 = 0,208 \text{ МОм} \gg [22].$$

Схемы для расчета токов короткого замыкания приведены на рисунке 2.



А - схема расчетная, Б - схема замещения, В - схема замещения упрощенная

Рисунок 2 – Схемы для определения токов КЗ

$$\ll R_{к.2 \text{ ступ.}} = 20 \text{ мОм,}$$

$$R_a = 0,7 \text{ мОм,}$$

$$X_a = 0,7 \text{ мОм,}$$

$$R_{к.пер.3 \times 50} = 0,043 \cdot 46 = 1,978 \text{ мОм,}$$

$$R_{п.3 \times 50 \text{ } \varnothing 50} = 0,37 \cdot 46 = 17,02 \text{ мОм,}$$

$$X_{п.3 \times 50 \text{ } \varnothing 50} = 0,085 \cdot 46 = 3,91 \text{ мОм,}$$

$$R_a = 0,7 \text{ мОм,}$$

$$\begin{aligned}
X_a &= 0,7 \text{ мОм}, \\
R_{\text{к.3 ступ}} &= 25 \text{ мОм}, \\
R_{\text{к.пер.3}\times\text{35}} &= 0,056 \cdot 5 = 0,28 \text{ мОм}, \\
R_a &= 1,3 \text{ мОм}, \\
R_{\text{к.4 ступ.}} &= 30 \text{ мОм}, \\
R_{\text{п.3}\times\text{35 } \emptyset 50} &= 0,53 \cdot 5 = 2,64 \text{ мОм}, \\
X_{\text{п.пер } 3\times 35 \emptyset 50} &= 0,088 \cdot 5 = 0,44 \text{ мОм} \gg [22].
\end{aligned}$$

Эквивалентные сопротивления на участках между точками К:

$$\langle R_{\text{э1}} = R_c + R_T + R_{\text{тк.1 ступ.}} \rangle \quad (37)$$

$$R_{\text{э1}} = 6 + 9,4 + 15 = 30,4 \text{ мОм},$$

$$X_{\text{э1}} = X_c + X_T, \quad (38)$$

$$X_{\text{э1}} = 7,49 + 27,2 = 34,69 \text{ мОм},$$

$$R_{\text{э2}} = R_a + R_{\text{к.пер.185}} + R_{\text{т.т.}} + R_{\text{каб } 3\times 185} + R_{\text{ш}} + R_{\text{к.2 ступ.}} \quad (39)$$

$$R_{\text{э2}} = 0,15 + 0,84 + 0,11 + 0,4 + 0,16 + 20 = 21,66 \text{ мОм},$$

$$X_{\text{э2}} = X_a + X_{\text{т.т.}} + X_{\text{каб.3}\times\text{185}} + X_{\text{ш}}, \quad (40)$$

$$X_{\text{э2}} = 0,17 + 0,17 + 0,2384 + 0,16 = 0,738 \text{ мОм},$$

$$R_{\text{э3}} = R_a + R_{\text{к.пер.3}\times\text{50}} + R_{\text{п.3}\times\text{50}}, \quad (41)$$

$$R_{\text{э3}} = 0,7 + 1,978 + 17,02 = 19,698 \text{ мОм},$$

$$X_{\text{э3}} = X_a + X_{\text{п.3}\times\text{50}}, \quad (42)$$

$$X_{\text{э3}} = 0,7 + 3,91 = 4,61 \text{ мОм},$$

$$R_{\text{э4}} = R_a + R_{\text{к.3 ступ}} + R_{\text{к.пер.3}\times\text{35}} + R_a + R_{\text{к.4 ступ}} + R_{\text{п.3}\times\text{35}}, \quad (43)$$

$$R_{\text{э4}} = 0,7 + 25 + 0,28 + 1,3 + 30 + 2,65 = 59,93 \text{ мОм},$$

$$X_{\text{э4}} = X_a + X_a + X_{\text{п.3}\times\text{35}}, \quad (44)$$

$$X_{\text{э4}} = 0,7 + 1,2 + 0,44 = 2,34 \text{ мОм} \gg [22].$$

Сопротивления до каждой точки КЗ:

$$\ll R_{K1} = R_{\text{Э1}} = 30,4 \text{ МОМ},$$

$$X_{K1} = X_{\text{Э1}} = 34,69 \text{ МОМ},$$

$$\frac{R_{K1}}{X_{K1}} = \frac{30,4}{34,69} = 0,876,$$

$$Z_{K1} = \sqrt{R_{K1}^2 + X_{K1}^2}, \quad (45)$$

$$Z_{K1} = \sqrt{30,4^2 + 34,69^2} = 46,1 \text{ МОМ},$$

$$R_{K2} = R_{K1} + R_{\text{Э2}}, \quad (46)$$

$$R_{K2} = 30,4 + 21,66 = 52,06 \text{ МОМ},$$

$$X_{K2} = X_{K1} + X_{\text{Э2}}, \quad (47)$$

$$X_{K2} = 34,69 + 0,5 = 35,19 \text{ МОМ},$$

$$\frac{R_{K2}}{X_{K2}} = \frac{52,06}{35,19} = 1,749,$$

$$Z_{K2} = \sqrt{R_{K2}^2 + X_{K2}^2}, \quad (48)$$

$$Z_{K2} = \sqrt{52,06^2 + 35,19^2} = 62,8 \text{ МОМ},$$

$$R_{K3} = R_{K2} + R_{\text{Э3}}, \quad (49)$$

$$R_{K3} = 52,06 + 19,698 = 71,8 \text{ МОМ},$$

$$X_{K3} = X_{K2} + X_{\text{Э3}}, \quad (50)$$

$$X_{K3} = 35,19 + 4,61 = 39,8 \text{ МОМ},$$

$$\frac{R_{K3}}{X_{K3}} = \frac{71,8}{39,8} = 1,8,$$

$$Z_{K3} = \sqrt{R_{K3}^2 + X_{K3}^2}, \quad (51)$$

$$Z_{K3} = \sqrt{71,8^2 + 39,8^2} = 82,1 \text{ МОМ},$$

$$R_{K4} = R_{K3} + R_{\text{Э4}}, \quad (52)$$

$$R_{K4} = 71,8 + 59,93 = 131,7 \text{ МОМ},$$

$$X_{K4} = X_{K3} + X_{\text{Э4}}, \quad (53)$$

$$X_{K4} = 39,8 + 2,34 = 42,1 \text{ МОМ},$$

$$\frac{R_{K4}}{X_{K4}} = \frac{131,7}{42,1} = 3,13,$$

$$Z_{K4} = \sqrt{R_{K4}^2 + X_{K4}^2}, \quad (54)$$

$$Z_{K4} = \sqrt{131,7^2 + 42,1^2} = 138,3 \text{ МОМ} \gg [22].$$

Коэффициенты K_y и q :

$$K_{y1} = F\left(\frac{R_{K1}}{X_{K1}}\right), \quad (55)$$

$$K_{y1} = F(0,876) = 1,04,$$

$$K_{y2} = F\left(\frac{R_{K2}}{X_{K2}}\right), \quad (56)$$

$$K_{y2} = F(1,479) = 1,0,$$

$$K_{y3} = F\left(\frac{R_{K3}}{X_{K3}}\right), \quad (57)$$

$$K_{y3} = F(1,8) = 1,0,$$

$$K_{y4} = F\left(\frac{R_{K4}}{X_{K4}}\right), \quad (58)$$

$$K_{y4} = F(3,13) = 1,0,$$

$$q_1 = \sqrt{1 + 2(K_{y1} - 1)^2}, \quad (59)$$

$$q_1 = \sqrt{1 + 2(1,04 - 1)^2} = 1,32,$$

$$q_2 = \sqrt{1 + 2(K_{y2} - 1)^2}, \quad (60)$$

$$q_2 = \sqrt{1 + 2(1,0 - 1)^2} = 1,$$

$$q_2 = q_3 = q_4 = 1.$$

Определение 3-фазных и 2-фазных токов КЗ:

$$I_{K1}^{(3)} = \frac{V_{K1}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K1}}, \quad (61)$$

$$I_{K1}^{(3)} = \frac{0,4 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 46,1} = 5,015 \text{ кА},$$

$$I_{K2}^{(3)} = \frac{V_{K2}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K2}}, \quad (62)$$

$$I_{K2}^{(3)} = \frac{U_{K2}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K2}} = \frac{0,38 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 62,8} = 3,498 \text{ кА},$$

$$I_{K3}^{(3)} = \frac{V_{K3}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K3}}, \quad (63)$$

$$I_{K3}^{(3)} = \frac{0,38 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 82,1} = 2,675 \text{ кА},$$

$$I_{K4}^{(3)} = \frac{V_{K4}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K4}}, \quad (64)$$

$$I_{K4}^{(3)} = \frac{0,38 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 138,3} = 1,588 \text{ кА},$$

$$I_{yK1} = q_1 \cdot I_{K1}^{(3)}, \quad (65)$$

$$I_{yK1} = 1,32 \cdot 5,015 = 6,620 \text{ А},$$

$$I_{yK2} = q_2 \cdot I_{K2}^{(3)}, \quad (66)$$

$$I_{yK2} = 1 \cdot 3,498 = 3,498 \text{ кА},$$

$$I_{yK3} = q_3 \cdot I_{K3}^{(3)}, \quad (67)$$

$$I_{yK3} = 1 \cdot 2,675 = 2,675 \text{ кА},$$

$$I_{yK4} = q_4 \cdot I_{K4}^{(3)}, \quad (68)$$

$$I_{yK4} = 1 \cdot 1,588 = 1,588 \text{ кА},$$

$$i_{yK1} = \sqrt{2} \cdot K_{y1} \cdot I_{K1}^{(3)}, \quad (69)$$

$$i_{yK1} = 1,41 \cdot 1,04 \cdot 5,015 = 7,354 \text{ кА},$$

$$i_{yK2} = \sqrt{2} \cdot K_{y2} \cdot I_{K2}^{(3)}, \quad (70)$$

$$i_{yK2} = 1,41 \cdot 1 \cdot 3,498 = 4,932 \text{ кА},$$

$$i_{yK3} = \sqrt{2} \cdot K_{y3} \cdot I_{K3}^{(3)}, \quad (71)$$

$$i_{yK3} = 1,41 \cdot 1 \cdot 2,675 = 3,772 \text{ кА},$$

$$i_{yK4} = \sqrt{2} \cdot K_{y4} \cdot I_{K4}^{(3)}, \quad (72)$$

$$i_{yK4} = 1,41 \cdot 1 \cdot 1,588 = 2,239 \text{ кА},$$

$$I_{K1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K1}^{(3)}, \quad (73)$$

$$I_{K1}^{(2)} = 0,87 \cdot 5,015 = 4,363 \text{ кА},$$

$$I_{K2}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K2}^{(3)}, \quad (74)$$

$$I_{K2}^{(2)} = 0,87 \cdot 3,498 = 3,043 \text{ кА},$$

$$I_{к3}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{к3}^{(3)}, \quad (75)$$

$$I_{к3}^{(2)} = 0,87 \cdot 2,675 = 2,327 \text{ кА},$$

$$I_{к4}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{к4}^{(3)}, \quad (76)$$

$$I_{к4}^{(2)} = 0,87 \cdot 1,588 = 1,382 \text{ кА}.$$

Сводные данные токов короткого замыкания приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Сводные данные токов короткого замыкания

Точка КЗ	R _к , МОм	X _к , МОм	Z _к , МОм	R _к /X _к	K _у	q	I _к ⁽³⁾ , кА	i _{ук} , кА	I _{ук} , кА	I _к ⁽²⁾ , кА	Z _п , МОм	I _к ⁽¹⁾ , кА
К1	30,4	34,69	46,1	0,876	1,04	1,32	5,015	7,35	6,62	4,36	119	1,93
К2	52,06	35,19	62,8	1,479	1,0	1	3,498	4,9	3,498	3,04	174,5	1,26
К3	71,8	39,8	82,1	1,8	1,0	1	2,675	3,77	2,675	2,33	412,3	0,533
К4	131,7	42,1	138,3	3,13	1,0	1	1,588	2,24	1,588	1,38	438,4	0,501

Выводы по разделу. В данном разделе выполнен расчет токов короткого замыкания для ключевых точек системы электроснабжения термического участка. Полученные данные позволяют обосновать выбор защитного оборудования, минимизировать риски аварий и обеспечить надежную работу сети в различных режимах. Это способствует повышению безопасности и сохранности электрооборудования.

5 Выбор и расчет электрических аппаратов и проводников

Эффективность работы системы электроснабжения предприятия во многом определяется правильным выбором основного электрооборудования. При проектировании необходимо учитывать характеристики потребителей, условия эксплуатации, а также требования по надежности и безопасности.

Основное электрооборудование включает в себя устройства для распределения, управления и защиты электроэнергии, такие как автоматические выключатели, кабели и распределительные устройства. Его выбор производится на основе расчетных нагрузок, токов короткого замыкания и условий эксплуатации, что позволяет обеспечить надежную работу системы даже в аварийных ситуациях.

Проверка оборудования включает оценку его соответствия расчетным параметрам, устойчивости к перегрузкам и способности работать при допустимых отклонениях напряжения. Это гарантирует его стабильную эксплуатацию на протяжении всего срока службы и минимизирует затраты на обслуживание.

«Для двухтрансформаторной подстанции должно выполняться условие:

$$S_{\text{тр}} \geq (0,65 \div 0,7) \cdot S_p, \quad (77)$$

$$S_{\text{тр}} \geq 0,7 \cdot 21347 = 14942,9 \text{» [15].}$$

Для проектируемой двухтрансформаторной подстанции выбираем трансформаторы двух типов ТДН-16000/110 и ТРДН-25000/110 [5].

Проверим возможность работы одного трансформатора в аварийном режиме.

Коэффициенты перегрузки:

$$K_{3,ав1} = \frac{21347}{16000} = 1,33 < 1,4,$$

$$K_{3,ав1} = \frac{21347}{25000} = 0,85 < 1,4.$$

Условие выполняется, следовательно, работа одного трансформатора с $S_{ном} = 16000$ кВА и $S_{ном} = 25000$ кВА в аварийном режиме возможна.

Технические данные трансформаторов приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Технические данные трансформаторов

Тип трансформатора	$S_{ном},$ кВА	Количество	$U_{ном},$ кВ		$\Delta P_x,$ кВт	$\Delta P_k,$ кВт	$U_k, \%$	$I_x, \%$
			ВН	НН				
ГДН-16000/110	16000	2	115	11	19	85	10,5	0,7
ГРДН-25000/110	25000	2	115	10,5	27	120	10,5	0,7

Оценка эффективности предложенных вариантов:

$$Z = E_n \cdot K_T + I, \quad (78)$$

где E_n – норма дисконта, равная 0,16;

K_T – капитальные вложения;

I – ежегодные эксплуатационные издержки» [15].

«Ежегодные эксплуатационные издержки:

$$I = I_a + I_{\Delta W}, \quad (79)$$

где I_a – издержки на амортизацию» [15].

$$I = 420 + 1065,32 = 1485,3 \text{ тыс. руб.}$$

«Издержки на амортизацию:

$$I_a = K_T \cdot a_T, \quad (80)$$

где a_T – коэффициент отчисления на амортизацию, $a_T = 0,1$;

$I_{\Delta W}$ – издержки из-за потерь электроэнергии, тыс.руб» [15].

$$I_a = 4200 \cdot 0,1 = 420 \text{ тыс. руб.}$$

«Издержки из-за потерь электроэнергии:

$$I_{\Delta W} = v \cdot \Delta W_{\text{т.г}}, \quad (81)$$

где $v=2,1037$ руб/кВт·ч – средняя себестоимость электроэнергии с учетом НДС;

$\Delta W_{\text{т.г}}$ – потери в трансформаторах» [15].

$$I_{\Delta W} = 2,1037 \cdot 506403,8 = 1065,3 \text{ тыс. руб.}$$

«Потери в трансформаторах:

$$\Delta W_{\text{т.г}} = n(\Delta P_x \cdot T_{\text{г}} + K_3^2 \cdot \Delta P_k \cdot \tau_{\text{нб}}), \quad (82)$$

где n – число трансформаторов;

$T_{\text{г}}$ – годовое число часов работы потребителей, $T_{\text{г}} = 7000$ часов;

$\tau_{\text{нб}}$ – время максимальных потерь электроэнергии» [15].

$$\Delta W_{\text{т.г}} = 2 \cdot (19 \cdot 7000 + 0,7^2 \cdot 85 \cdot 2886) = 506403,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

$$\tau_{\text{нб}} = \left(0,124 + \frac{T_{\text{max.A}}}{10000}\right) \cdot 8760, \quad (83)$$

где « $T_{\text{max.A}}$ – время использования максимума нагрузки, равное 4500 часов» [23].

$$\tau_{\text{нб}} = \left(0,124 + \frac{4500}{10000}\right) \cdot 8760 = 2886 \text{ ч,}$$

$$E_{\text{н}} \cdot K_{\text{т}} = 0,16 \cdot 4200 = 672 \text{ тыс. руб.,}$$

$$k_T = 4200 \text{ тыс. руб.},$$

$$З = 672 + 1485,32 = 2157,3 \text{ тыс. руб.}$$

Результаты приведенных затрат по двум вариантам приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты приведенных затрат по двум вариантам

Тип тр-ра	S _{ном} , кВА	Кол-во, шт.	k _T , тыс. руб.	I _а , тыс. руб.	ΔW _{T,Г} , тыс. кВт·ч	I _{Δw} , тыс. руб.	I, тыс. руб.	E _{н·к_T} , тыс. руб.	З, тыс. руб.
2хТДН- 16000/110	16000	2	4200	420	506,4	1065,3	1485,3	672	2157,3
2хТРДН- 25000/110	25000	3	6000	600	717,4	1509,2	2109,2	960	3069,2

Номинальный ток:

$$I_N = \frac{48}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,92 \cdot 0,89} = 89,2 \text{ А.} \quad (84)$$

Пусковой ток:

$$I_{\text{пуск}} = I_N \cdot 6,5, \quad (85)$$

$$I_{\text{пуск}} = 89,2 \cdot 6,5 = 579,8 \text{ А,}$$

$$K_{\text{и}} = 0,65.$$

Пиковый ток:

$$I_{\text{пик}} = (416,9 - 0,65 \cdot 89,2) + 579,8 = 938,72 \text{ А.} \quad (86)$$

Ток уставки:

$$I_{y(тр)} = 3 \cdot I_{ап}, \quad (87)$$

$$I_{y_{эмр}} = 3 \cdot 400 = 1200 \text{ А.}$$

Выводы по разделу. Таким образом, в данном разделе произведен анализ нагрузок на каждом этапе работы подстанции. Для проектируемой двухтрансформаторной подстанции выбраны трансформаторы двух типов ТДН-16000/110 и ТРДН-25000/110, с учетом их характеристик, соответствующих заданным условиям эксплуатации и требованиям безопасности. Проведены точные расчеты токов нагрузки, что обеспечило правильный выбор сечения проводников для минимизации потерь энергии и предотвращения перегрева. Все выбранные аппараты и проводники отвечают действующим нормативным требованиям, что гарантирует безопасность и долговечность работы системы.

6 Выбор основного электрооборудования и его проверка

Выбор основного электрооборудования включает в себя несколько ключевых этапов. Прежде всего, необходимо определить требования проекта, включая мощность, напряжение, тип нагрузки и климатические условия. После этого выбираются основные компоненты: трансформаторы, генераторы, распределительные щиты, кабели и защитные устройства. Важно учитывать стандарты безопасности и надежности, а также возможные перспективы расширения конфигурации.

Проверка электрооборудования включает в себя визуальный осмотр, тестирование на соответствие техническим характеристикам и испытания на короткое замыкание. Также следует производить проверки системы защитных устройств и заземления.

Профессиональный подход к выбору и проверке электрооборудования обеспечивает его эффективную и безопасную эксплуатацию.

«Расчет сечения проводников по условию экономической плотности тока:

$$S_{\text{э}} = \frac{I_{\text{р}}}{j_{\text{э}}}, \quad (88)$$

где $j_{\text{э}}$ – экономическая плотность тока, А/мм²» [13].

«Расчетное значение рабочего тока нормального режима:

$$I_{\text{н}} = \frac{P_{\text{р}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi}, \quad (89)$$

где $S_{\text{р}}$ – расчётная полная нагрузка линии, кВА» [16].

Расчетное значение рабочего тока послеаварийного режима:

$$I_a = 1,4 \cdot \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = 1,4 \cdot I_H. \quad (90)$$

«Проверка проводников воздушных и кабельных линий СЭС термического участка в нормальном режиме работы:

$$I_{доп} \geq I_p, \quad (91)$$

где $I_{доп}$ – предельно допустимое справочное значение тока выбранного проводника линии, А» [16].

«Проверка проводников воздушных и кабельных линий СЭС термического участка цеха в послеаварийном режиме работы:

$$I \geq_{доп} I_{p.max}, \quad (92)$$

где $I_{p.max}$ – максимальный ток послеаварийного режима работы линии с учётом условий резервирования в схеме, А» [18].

Выполнение данного условия проверяется по следующему соотношению:

$$S_{ст} \geq S_{мин}. \quad (93)$$

Выводы по разделу. В данном разделе было оценено оборудование по параметрам эффективности, обеспечен гармоничный подбор всех компонентов в системе, что увеличивает общую устойчивость и функциональность. Проведенные расчеты подтвердили работоспособность и стабильность оборудования, что снижает риски его выхода из строя в процессе эксплуатации.

7 Расчет релейной защиты и автоматики

Релейная защита и автоматика являются неотъемлемыми элементами системы электроснабжения, обеспечивая оперативное выявление и устранение аварийных ситуаций. Правильный расчет и настройка этих систем позволяют предотвратить повреждение оборудования, минимизировать время отключения потребителей и обеспечить безопасность персонала.

В задачи релейной защиты входят обнаружение перегрузок, коротких замыканий и других нарушений в работе сети, а также их автоматическое устранение. Выбор устройств защиты производится с учетом характеристик электрооборудования, токов короткого замыкания и условий эксплуатации. Особое внимание уделяется обеспечению селективности срабатывания релейной защиты, что позволяет изолировать неисправный участок сети без отключения остальных потребителей.

Автоматические устройства управления, в свою очередь, обеспечивают корректное функционирование системы в нормальных и аварийных режимах, включая включение резервных источников питания и восстановление работы оборудования.

Номинальный ток:

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}}, \quad (94)$$
$$I_{\text{НОМ}} = \frac{400}{1,73 \cdot 0,38} = 608,4 \text{ А.}$$

По номинальному току для защиты отходящего распределительного устройства щитовой выбираем автоматический выключатель ВА-51-39 на $I_{\text{ап}} = 630 \text{ А}$.

«Ток уставки теплового расцепителя» [3]:

$$I_{у.тр} = 1,25 \cdot I_{ап}, \quad (95)$$

$$I_{у.тр} = 1,25 \cdot 630 = 787,5 \text{ А.}$$

«Пиковый ток:

$$I_{пик} = (I_M - K_{и} \cdot I_{ном}) + I_{пуск}, \quad (96)$$

где I_M – максимальный ток нагрузки трансформатора;

$K_{и}$ – принятый коэффициент использования электродвигателя запускаемого станка;

$I_{ном}$ – номинальный ток самого мощного электродвигателя;

$I_{пуск}$ – пусковой ток электродвигателя» [8].

Технические характеристики токоприемников приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Технические характеристики токоприемников

Наименование станка	Тип двигателя	$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	Каталожные значения			$I_{пуск}$	$I_{ном}$
				$\eta_{ном}$	$\cos\varphi$	$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$		
Печь сопротивления	4А132S8У3	4	380	82	0,7	1,4	14,7	10,5
Станок фрезерный	4А160М8У3	8,5	380	87	0,75	6	118,8	19,8
Станок радиально-сверлильный	4А160М8У3	9	380	87	0,75	6	126	21
Пресс кривошипный	4А180М8У3	10	380	75	0,87	6	88,5	14,7
Пресс фрикционный	4А180М8У3	12	380	87	0,82	6	153,6	25,6
Вертикально-намоточный станок	4А180М8У3	15	380	87	0,82	6	192	32
Штамповочный автомат	ДАО	3,2	220	59...63 61	0,4...0,6 0,5	1,5	57,7	38,5
Станок шлифовальный	4А160М8У3	9,5	380	87	0,75	6	133,2	22,2
Штамп фасонный	ДАО	3,2	220	59...63 61	0,4...0,6 0,5	1,5	57,7	38,5
Печь индукционная	4А160М8У3	9	380	87	0,75	6	126	21
Вентиляционная установка	4АН200L4У3	48	380	92	0,89	6,5	579,8	89,2
Кран-балка	МТКФ411-6	25/19,4	380	82,5	0,79	2,2	99,4	45,2
Заточный станок	ДАО	3	220	59...63 60	0,4...0,6 0,5	1,5	54,1	36,5

«Расчет элементов ЭСН запитанных от РП-1.

Вентиляторы: $P_H = 48$ кВт, $I_{НОМ} = 89,2$ А, $I_{ПУСК} = 579,8$ А.

Принимаем автомат ВА 51-33 $I_{АП} = 100$ А.

$$I_{y.тр} = 1,25 \cdot 100 = 125 \text{ А},$$

$$КУ_{эмр} = \frac{579,8}{100} = 5,79.$$

Тогда $I_{y.эмр} = 7 \cdot 100 = 700$ А.

Принимаем автомат ВА51-33 $I_{АП} = 125$ А.

$$I_{y.тр} = 1,25 \cdot 125 = 156,3 \text{ А},$$

$$КУ_{эмр} = \frac{(I_{р.рп} - K_H \cdot I_{НОМ}) + I_{ПУСК}}{I_{АП}},$$

$$КУ_{эмр} = \frac{(118,7 - 0,65 \cdot 89,2) + 579,8}{125} = 5,1.$$

(97)

Тогда $I_{y.эмр} = 7 \cdot 125 = 875$ А.

Принимаем автомат ВА 51-33 $I_{АП} = 125$ А, $I_{y.тр} = 156,3$ А.

Тогда $I_{y.эмр} = 10 \cdot 125 = 1250$ А» [22].

«Расчет элементов ЭСН запитанных от РП-2.

Пресс кривошипный: $P_H = 10$ кВт, $I_{НОМ} = 14,7$ А, $I_{ПУСК} = 88,5$ А.

$$I_{НОМ \text{ САГ}} = \frac{P_H \cdot \sqrt{ПВ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H},$$

$$I_{НОМ \text{ САГ}} = \frac{10 \cdot \sqrt{0,4}}{1,73 \cdot 0,38 \cdot 0,65 \cdot 0,75} = 19,7 \text{ А}.$$

(98)

Принимаем автомат ВА 51-31 $I_{АП} = 20$ А.

$$I_{y.тр} = 1,35 \cdot 20 = 27 \text{ А},$$

$$КУ_{\text{эмр}} = \frac{88,5}{20} = 4,4.$$

Тогда $I_{\text{у.эмр}} = 7 \cdot 20 = 140 \text{ А}$.

Принимаем автомат ВА 51-31 $I_{\text{ап}} = 25 \text{ А}$.

$$I_{\text{у.тр}} = 1,35 \cdot 25 = 33,8 \text{ А},$$

$$КУ_{\text{эмр}} = \frac{(13,2 - 0,3 \cdot 14,7) + 88,5}{25} = 3,9.$$

Тогда $I_{\text{у.эмр}} = 7 \cdot 25 = 175 \text{ А}$.

Принимаем автомат ВА 51-31 $I_{\text{ап}} = 25 \text{ А}$, $I_{\text{у.тр}} = 33,8 \text{ А}$.

Тогда $I_{\text{у.эмр}} = 10 \cdot 25 = 250 \text{ А}$ » [23].

«Расчет элементов ЭСН запитанных от ШРА-1.

Спуск от ШРА-1 до станка 6,7,8 (пресс фрикционный $P_{\text{н}} = 12 \text{ кВт}$, $I_{\text{ном}} = 25,6 \text{ А}$, $I_{\text{пуск}} = 153,6 \text{ А}$).

Принимаем автомат ВА 51-31 $I_{\text{ап}} = 31,5 \text{ А}$.

$$I_{\text{у.тр}} = 1,35 \cdot 31,5 = 42,5 \text{ А},$$

$$КУ_{\text{эмр}} = \frac{153,6}{31,5} = 4,9.$$

Тогда $I_{\text{у.эмр}} = 7 \cdot 31,5 = 220,5 \text{ А}$.

Принимаем автомат ВА 51-31 $I_{\text{ап}} = 40 \text{ А}$.

$$I_{\text{у.тр}} = 1,35 \cdot 40 = 54 \text{ А},$$

$$КУ_{\text{эмр}} = \frac{192}{40} = 4,8.$$

Тогда $I_{\text{у.эмр}} = 7 \cdot 40 = 280 \text{ А}$.

Принимаем автомат ВА 51-31 $I_{\text{ап}} = 12,5 \text{ А}$.

$$I_{y.тр} = 1,35 \cdot 12,5 = 16,9 \text{ A,}$$

$$КУ_{\text{эмр}} = \frac{14,7}{12,5} = 1,2.$$

Тогда $I_{y.эмр} = 7 \cdot 12,5 = 87,5 \text{ A.}$

По току $I_M = 71,7 \text{ A}$ выбираем вводной автомат ВА 51-31 $I_{ап} = 80 \text{ A.}$

$$I_{y.тр} = 1,25 \cdot 80 = 100 \text{ A.}$$

$$КУ_{\text{эмр}} = \frac{(71,7 - 0,24 \cdot 32) + 192}{80} = 3,2.$$

Тогда $I_{y.эмр} = 7 \cdot 80 = 560 \text{ A.}$

$$I_{п} = \frac{I_{\text{пуск}}}{2,0} = \frac{54,1}{2,0} = 27 \text{ A.}$$

$$I_{п} = \frac{I_{\text{пуск}}}{2,5} = \frac{57,7}{2,5} = 23,1 \text{ A.}$$

Принимаем автомат ВА 51-31 $I_{ап} = 25 \text{ A.}$

$$I_{y.тр} = 1,35 \cdot 25 = 33,8 \text{ A.}$$

$$КУ_{\text{эмр}} = \frac{126}{25} = 5.$$

Тогда $I_{y.эмр} = 7 \cdot 25 = 175 \text{ A.}$

Принимаем автомат ВА 51-31 $I_{ап} = 20 \text{ A.}$

$$I_{y.тр} = 1,35 \cdot 20 = 27 \text{ A,}$$

$$КУ_{\text{эмр}} = \frac{118,8}{20} = 5,9.$$

Тогда $I_{y.эмп} = 7 \cdot 20 = 140 \text{ А}$.

Принимаем автомат ВА 51-31 $I_{ап} = 50 \text{ А}$.

$$I_{y.тр} = 1,35 \cdot 50 = 67,5 \text{ А},$$

$$КУ_{эмп} = \frac{99,4}{50} = 2.$$

Тогда $I_{y.эмп} = 7 \cdot 50 = 350 \text{ А}$.

Выбираем вводной автомат ВА 51-31 $I_{ап} = 100 \text{ А}$.

$$I_{y.тр} = 1,25 \cdot 100 = 125 \text{ А}.$$

$$КУ_{эмп} = \frac{(92,5 - 0,239 \cdot 25) + 99,4}{50} = 3,7.$$

Тогда $I_{y.эмп} = 7 \cdot 100 = 700 \text{ А}$.

Принимаем автомат ВА 51-31 $I_{ап} = 31,5 \text{ А}$.

$$I_{y.тр} = 1,35 \cdot 31,5 = 42,5 \text{ А},$$

$$КУ_{эмп} = \frac{160,2}{31,5} = 5,1.$$

Тогда $I_{y.эмп} = 7 \cdot 31,5 = 220,5 \text{ А}$.

Принимаем автомат ВА 51-31 $I_{ап} = 25 \text{ А}$.

$$I_{y.тр} = 1,35 \cdot 25 = 33,8 \text{ А},$$

$$КУ_{эмп} = \frac{133,2}{25} = 5,3.$$

Тогда $I_{y.эмп} = 7 \cdot 25 = 175 \text{ А}$.

Принимаем автомат ВА 51-31 $I_{ап} = 25 \text{ А}$.

$$I_{y.ct} = 1,35 \cdot 25 = 33,8 \text{ A},$$

$$КУ_{\text{эмр}} = \frac{147}{25} = 5,9.$$

Тогда $I_{y.эмр} = 7 \cdot 25 = 175 \text{ A}$.

Принимаем автомат ВА 51-31 $I_{ап} = 50 \text{ A}$.

$$I_{y.тp} = 1,35 \cdot 50 = 67,5 \text{ A},$$

$$КУ_{\text{эмр}} = \frac{99,4}{50} = 2.$$

Тогда $I_{y.эмр} = 7 \cdot 50 = 350 \text{ A}$ » [22].

По $I_{y.тp}$ принимаем провод ПРТО 4×16 в трубе диаметром 40 длиной 12 метров и троллейный шинопровод ШТМ $I_H = 100 \text{ A}$.

По току $I_M = 99,9 \text{ A}$ выбираем вводной автомат ВА 51-31 $I_{ап} = 100 \text{ A}$.

$$I_{ап} = 1,25 \cdot 99,9 = 124,9 \text{ A}.$$

$$КУ_{\text{эмр}} = \frac{(99,9 - 0,201 \cdot 26,7) + 160,2}{50} = 5,1.$$

Тогда $I_{y.эмр} = 7 \cdot 100 = 700 \text{ A}$.

Выводы по разделу. В данном разделе выбраны соответствующие релейные схемы и устройства, обеспечивающие надежную защиту электрических установок от различных видов повреждений, таких как короткое замыкание и перегрузка. Проведены тщательные расчеты настроек реле, что позволило установить оптимальные величины токовых срабатываний и временных задержек для быстрого реагирования на неисправности. Все решения соответствуют действующим нормативам и стандартам, что подтверждает их безопасность и эффективность.

8 Расчет заземления и молниезащиты

Системы заземления и молниезащиты играют ключевую роль в обеспечении безопасной эксплуатации электроустановок. Они защищают оборудование и персонал от поражения электрическим током, возникающим из-за пробоя изоляции, перенапряжений или удара молнии [2].

Заземление снижает напряжение на корпусах оборудования до безопасного уровня и обеспечивает эффективный отвод токов замыкания на землю. При проектировании системы заземления учитываются характеристики грунта, климатические условия, а также особенности оборудования и объекта в целом.

Молниезащита предотвращает повреждение оборудования и зданий, обеспечивая безопасный путь для отвода молниевых разрядов. При расчете молниезащиты важно правильно определить зону защиты и подобрать оптимальное расположение молниеотводов.

В данном разделе рассмотрены методики проектирования систем заземления и молниезащиты, что позволяет обеспечить надежность и безопасность работы электросети.

Сопротивление первого вертикального заземлителя:

$$R_B = 0,302 \cdot \rho_{\text{расч}} \cdot K_c, \quad (99)$$

$$R_B = 0,302 \cdot 20 \cdot 1,8 = 10,87 \text{ Ом.}$$

Количество электродов для обеспечения необходимой величины нормируемого сопротивления 4 Ом:

$$\frac{R_B}{\eta_{\text{эк}}} = \frac{10,87}{4} = 2,72.$$

При коэффициенте экранирования $\eta_{\text{эк}} = 0,679$, получается 4 электрода.

«Сопrotивление горизонтального заземлителя:

$$r_p = \frac{0,366 \cdot \rho_{\text{расч}}}{l} \cdot \lg \frac{l^2}{dt}, \quad (100)$$

где l - длина горизонтального заземлителя» [20].

$$r_p = \frac{0,366 \cdot 20 \cdot 1,05}{10,5} \cdot \lg \frac{10,5^2}{0,11 \cdot 0,5} = 4,08 \text{ Ом.}$$

Длина горизонтального заземлителя:

$$\begin{aligned} l_{\text{ГЗ}} &= m_{\text{ЭЛ}} \cdot l \cdot 1,05, \\ l_{\text{ГЗ}} &= 4 \cdot 2,5 \cdot 1,05 = 10,5 \text{ м.} \end{aligned} \quad (101)$$

Что меньше 4 Ом.

Размеры здания составляют $48 \times 30 \times 8$ м.

Высота вершин конусов молниеотводов h_0 :

$$\begin{aligned} h_0 &= 0,85 \cdot h, \\ h_0 &= 0,85 \cdot 35 = 29,8 \text{ м.} \end{aligned} \quad (102)$$

Радиус защиты на уровне земли r_0 :

$$\begin{aligned} r_0 &= (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot h) \cdot h, \\ r_0 &= (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 35) \cdot 35 = 36,1 \text{ м.} \end{aligned} \quad (103)$$

Радиус защиты на высоте защищаемого сооружения $h=9$ м.

$$\begin{aligned} R_x &= (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot h) \cdot (h - 1,2 \cdot h_x), \\ R_x &= (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 35) \cdot (35 - 1,2 \cdot 8) = 24,9 \text{ м.} \end{aligned} \quad (104)$$

Высота h_c и ширина r_{cx} средней части:

$$h_c = h_0 - (0,17 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot h) \cdot (L - h), \quad (105)$$

$$h_c = (0,17 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot 35) \cdot (48 - 35) = 27,5 \text{ м},$$

где $L=48$ м - расстояние между двумя стержневыми молниеотводами.

$$R_{cx} = r_0 \cdot (h_c - h_x) \cdot \frac{1}{h_c}. \quad (106)$$

$$R_{cx} = 36,1 \cdot (27,5 - 9) \cdot \frac{1}{27,5} = 24,3 \text{ м}.$$

Возможная поражаемость защищаемого объекта:

$$N = [(B + 6 \cdot h_x) \cdot (A + 6 \cdot h_x) - 7,7 \cdot h_x^2] \cdot n \cdot 10^{-6} \quad (107)$$

где A и B – длина и ширина здания.

$$N = [(28 + 6 \cdot 8) \cdot (48 + 8 - 7,7 \cdot 8^2)] \cdot 7 \cdot 10^{-6} = 3,9$$

Зона защиты двухстержневого молниеотвода представлена на рисунке

3.

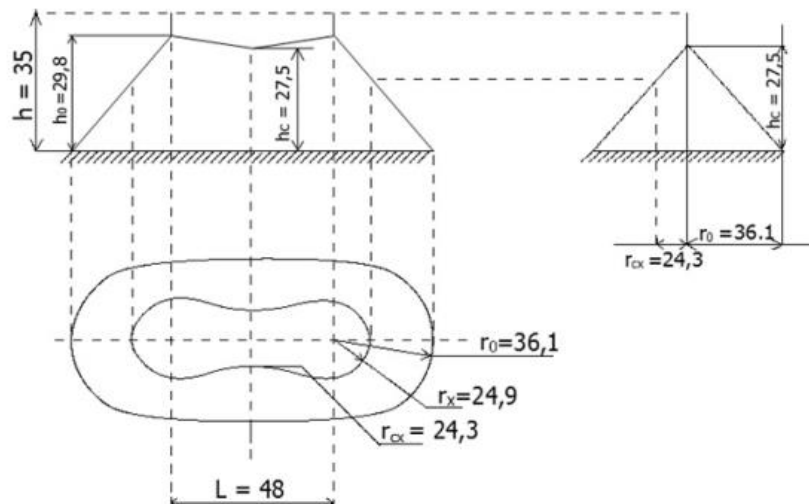


Рисунок 3 – Зона защиты двухстержневого молниеотвода

Выводы по разделу. В данном разделе произведены расчеты систем заземления и молниезащиты. Сооружение данных систем производится в обязательном порядке в ходе проектирования системы электроснабжения. Это позволило разработать технические решения, соответствующие современным требованиям безопасности и надежности. Проектируемая система заземления обеспечивает эффективное снижение напряжения на корпусах оборудования и надежный отвод токов замыкания на землю. Учет характеристик грунта и особенностей оборудования позволяет гарантировать соответствие расчетных параметров нормативным требованиям. Система молниезащиты спроектирована с учетом риска ударов молнии и включает оптимальное расположение молниеотводов для создания зон защиты. Это обеспечивает предотвращение повреждений зданий и оборудования от молниевых разрядов.

Заключение

В процессе выполнения данной выпускной квалификационной работы была разработана система электроснабжения для термического участка ООО «Тольяттинский судоремонтный завод», соответствующая современным требованиям надежности и энергоэффективности. Реализация предложенного проекта направлена на обеспечение стабильного и безопасного энергоснабжения для выполнения различных технологических операций, таких как отжиг, закалка и цементация, что имеет ключевое значение для повышения производительности и качества выпускаемой продукции.

Проведенный анализ исходных данных и расчеты нагрузок позволили подобрать оптимальные варианты оборудования, включая трансформаторы, устройства релейной защиты и автоматизации. В проекте были учтены все аспекты, влияющие на надежность работы системы: от выбора кабельных линий до разработки схем заземления и молниезащиты. Особое внимание уделено вопросам компенсации реактивной мощности, что позволило существенно сократить потери электроэнергии и снизить эксплуатационные расходы.

Реализация разработанных решений позволит повысить уровень безопасности и стабильности электроснабжения, что особенно важно в условиях высоких требований к производственным процессам на судоремонтных предприятиях. Проект также направлен на оптимизацию использования энергоресурсов, что способствует снижению затрат и увеличению экономической эффективности предприятия.

Таким образом, поставленные цели и задачи проекта успешно выполнены, что подтверждает эффективность предложенных решений и их соответствие современным стандартам в области электроснабжения и энергосбережения.

Список используемых источников

1. Анчарова Т.В., Рашевская М.А., Стебунова Е.Д. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений : учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2023. 415 с.
2. Бейербах В.А. Инженерные сети, инженерная подготовка и оборудование территорий, зданий, стройплощадок: учебное пособие: для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования. 3-е изд., доп. и перераб. Ростов-на-Дону : Феникс, 2009. 568 с.
3. Бурулько Л.К., Деметьев Ю.Н. Электрооборудование промышленности. Часть 1. Источники, приемники и преобразователи электрической энергии: учебно-методическое пособие. Томск : Томский политехнический университет, 2012. 162 с.
4. Быстрицкий Г.Ф., Кудрин Б.И. Выбор и эксплуатация силовых трансформаторов: учеб. пособие для сред. проф. образования. М. : Издательский центр «Академия», 2003. 176 с.
5. ГОСТ 14209–85 Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки (с Изменением № 1). [Электронный ресурс]: URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200012414> (дата обращения: 14.08.2024).
6. ГОСТ Р 59279-2020 «Схемы принципиальные электрические распределительных устройств от 35 до 750 кВ подстанций». [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200177281> (дата обращения: 14.08.2024).
7. Ершов А.М. Системы электроснабжения. Часть 2. Электрические нагрузки. Компенсация реактивной мощности: курс лекций. Челябинск : Южно-Уральский государственный университет, 2018. 230 с.
8. Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Лаптев О.И. Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2008. 343 с.

9. Коновалова Л.Л., Рожкова Л.Д. Электроснабжение промышленных предприятий и установок: учеб. пособие для техникумов. М. : Энергоатомиздат, 1989. 528 с.
10. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: учеб. для студентов вузов, обучающихся по курсу «Электроснабжение пром. Предприятий». М. : Интермет Инжиниринг, 2007. 670 с.
11. Куксин А.В. Электроснабжение промышленных предприятий. Учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2021. 156 с.
12. Ополева Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов : учебное пособие. М. : Форум, 2024. 416 с.
13. Правила устройства электроустановок: действующие разделы 6-го и 7-го изданий. М. : НИЦ ИНФРА-М, 2024. 828 с.
14. РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. М. : Издательство НЦ ЭНАС, 2002. 149 с.
15. Рожкова Л.Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций: Учебник для студентов учреждений среднего профессионального образования. М. : ИЦ Академия, 2018. 448 с.
16. Сибикин Ю.Д. Пособие к курсовому и дипломному проектированию электроснабжения промышленных, сельскохозяйственных и городских объектов. Учебное пособие. М. : Форум, 2023. 383 с.
17. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение промышленных и гражданских зданий. Учебное пособие. М. : НИЦ Инфра-М, 2024. 405 с.
18. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю., Яшков В.А. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. Учебное пособие. М. : Форум, Инфра-М, 2022. 365 с.
19. Сумарокова Л.П. Электроснабжение промышленных предприятий: учебное пособие. Томск : Издательство ТПУ, 2012. 288 с.
20. Устройство молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций Сборник документов. Серия 17. Выпуск 27. Электронный

ресурс]: URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294815/4294815349.pdf> (дата обращения: 21.08.2024).

21. Фролов Ю.М., Шелякин В.П. Основы электроснабжения: учебное пособие. СПб. : Издательство «Лань», 2021. 480 с.

22. Шеховцов В.П. Расчет и проектирование схем электроснабжения. Методическое пособие для курсового проектирования. 3-е изд., испр. М. : ИНФРА-М, 2024. 214 с.

23. Шеховцов В.П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению: учебное пособие. М. : ИНФРА-М, 2024. 136 с.