

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 электрической части подстанции 110/6/6 кВ химического предприятия

Обучающийся

А. М. Худолей

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.п.н., доц. М. Н. Третьякова

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

Тольятти 2025

Аннотация

Выпускная квалификационная работа посвящена проектированию электрической части подстанции 110/6/6 кВ, предназначенной для обеспечения надёжного электроснабжения химического предприятия. Актуальность темы обусловлена высокой потребностью современных промышленных предприятий в устойчивых и безопасных системах электроснабжения, соответствующих современным требованиям по надёжности, энергоэффективности и безопасности.

Цель работы - разработка проекта подстанции, включающего выбор оборудования, систем защиты, заземления и молниезащиты, а также выполнение необходимых расчётов для обеспечения её безопасной и надёжной эксплуатации. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: анализ электрических нагрузок предприятия, выбор силового и вспомогательного оборудования, расчёт токов короткого замыкания, проектирование релейной защиты и автоматики, а также разработка систем заземления и молниезащиты.

В работе подробно рассмотрены особенности нагрузки предприятия, включающей потребителей 1 и 2 категорий надёжности, выполнены расчёты электрических параметров и определён выбор оборудования, включая трансформаторы, выключатели, разъединители, трансформаторы тока и напряжения, а также защитные устройства. Особое внимание уделено разработке релейной защиты с использованием современных микропроцессорных устройств. Выполнен расчёт системы заземления и молниезащиты, обеспечивающих защиту оборудования и персонала от аварийных режимов и ударов молнии.

Общий объем работы составляет 58 страниц, 11 рисунков, 13 таблиц и 6 чертежей формата А1.

Содержание

Введение.....	4
1 Анализ специфики химического предприятия и основных электроприемников подстанции	6
1.1 Специфика химического предприятия.....	6
1.2 Основные электроприёмники подстанции	7
2 Разработка структурной и принципиальной схем подстанции	9
2.1 Структурная схема подстанции.....	9
2.2 Принципиальная схема подстанции.....	10
3 Расчет электрических нагрузок и выбор силовых трансформаторов.....	13
3.1 Расчет электрических нагрузок	13
3.2 Выбор силовых трансформаторов.....	16
4 Расчет токов короткого замыкания и выбор оборудования электрической части подстанции	18
4.1 Расчет токов короткого замыкания	18
4.2 Выбор оборудования электрической части подстанции.....	22
5 Разработка РЗА подстанции.....	42
6 Расчет заземления и молниезащиты.....	46
6.1 Расчет заземления	46
6.2 Расчет молниезащиты.....	51
Заключение	55
Список используемой литературы и используемых источников.....	57

Введение

Современное состояние промышленности требует высокой надёжности и энергоэффективности систем электроснабжения, особенно для предприятий химической промышленности, где прерывания электроснабжения могут привести к значительным экономическим убыткам, технологическим сбоям и угрозам безопасности. Энергетическая инфраструктура таких предприятий должна соответствовать современным стандартам, обеспечивая стабильное энергоснабжение, безопасность эксплуатации и возможность адаптации к будущим изменениям в нагрузке.

Развитие технологий в области электротехнического оборудования позволяет проектировать подстанции, которые отвечают требованиям современных промышленных предприятий. Однако для таких решений необходим комплексный подход, включающий не только выбор оборудования, но и разработку систем защиты, заземления и молниезащиты, а также выполнение точных электротехнических расчётов. Подстанции, работающие на напряжениях 110/6/6 кВ, играют ключевую роль в энергоснабжении крупных предприятий, обеспечивая передачу и распределение электрической энергии между сетями высокого и среднего напряжения.

Актуальность темы, данной выпускной квалификационной работы заключается в необходимости проектирования подстанции, способной обеспечить надёжное электроснабжение химического предприятия, включающего энергозависимые процессы, такие как производство полимеров, синтетической резины, полиуретанов и других химических веществ. Учитывая специфику производственных процессов, особое внимание уделяется безопасности, защите оборудования от аварийных режимов и снижению возможных финансовых и технологических рисков.

Целью работы является разработка проекта подстанции 110/6/6 кВ для обеспечения стабильного, безопасного и надёжного электроснабжения

химического предприятия. Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

- проанализировать электрические нагрузки предприятия, выявить потребности в электроэнергии и категории надёжности;
- рассчитать электрические параметры, включая токи короткого замыкания, рабочие токи и нагрузки на оборудование;
- выбрать силовое оборудование, включая трансформаторы, выключатели, разъединители и ограничители перенапряжений;
- разработать релейную защиту и автоматику с использованием современных микропроцессорных устройств;
- выполнить расчёт систем заземления и молниезащиты, обеспечивающих безопасность персонала и оборудования;
- обосновать выбор технических решений, включая компоновку оборудования и схемы подстанции.

Таким образом, данная работа направлена на создание проекта подстанции, которая обеспечит бесперебойное электроснабжение химического предприятия, защиту его оборудования от аварийных режимов и высокий уровень эксплуатационной безопасности.

1 Анализ специфики химического предприятия и основных электроприемников подстанции

1.1 Специфика химического предприятия

Химическое предприятие, ориентированное на производство упаковочных материалов и специализированных пластмасс, включает в себя широкий спектр технологических процессов. Основная продукция предприятия включает полиэтилен, полипропилен, синтетическую резину, полиуретаны, растворители и смазочные материалы. Эти продукты требуют сложных и энергоёмких процессов, таких как полимеризация, экструзия, химическое смешивание, дистилляция и реакция синтеза.

Далее перечислены основные производственные цеха и технологические установки, расположенные на территории предприятия.

Цех полимеризации и экструзии

Производство полиэтилена и полипропилена осуществляется методом полимеризации сырья (например, этилена и пропилена) в реакторах высокого давления. Для последующей обработки используются экструдеры и грануляторы. Этот цех имеет высокие требования к стабильности подачи электроэнергии для работы компрессоров, насосов и реакторного оборудования.

Цех синтеза синтетической резины

Производственный процесс включает смешивание сырья, реакцию синтеза, дистилляцию побочных продуктов и последующую переработку. Электроприёмники цеха включают нагреватели, смесители и реакционные установки, потребляющие значительные объёмы электроэнергии.

Цех производства полиуретанов

Производство полиуретанов осуществляется путем реакции изоцианатов с полиолами. Данный процесс требует точного контроля

температурного режима и работы высокоточного дозирочного оборудования, включая насосы, компрессоры и системы контроля.

Цех переработки растворителей и смазочных материалов

Этот цех занимается перегонкой, очисткой и смешиванием компонентов для получения конечной продукции. Среди электроприёмников выделяются насосы, испарители, миксеры и системы охлаждения.

Цех подготовки и переработки сырья

Сюда входят склады и системы транспортировки сырья (например, этан, пропан, бутан), а также узлы переработки и хранения. Для обеспечения работы компрессоров и насосов требуется постоянное электроснабжение.

Цех упаковки и логистики

Завершающий этап производства включает автоматизированные линии упаковки, транспортировки и маркировки готовой продукции.

1.2 Основные электроприёмники подстанции

Электроснабжение предприятия осуществляется через подстанцию 110/6/6 кВ. К основным электроприёмникам подстанции относятся:

- высоковольтное оборудование цехов (электродвигатели компрессоров и насосов для полимеризации и синтеза, электроприводы экструдера, электрические нагреватели реакторного оборудования);
- системы вентиляции и газоочистки (для обеспечения экологической безопасности работы предприятия);
- автоматизированные линии упаковки (электроприводы конвейеров и роботизированных систем);
- резервное энергоснабжение и аварийное освещение (системы аварийного питания для важных технологических узлов).

Эффективное проектирование подстанции с учётом специфики предприятия и потребностей перечисленных цехов позволит обеспечить надёжное и безопасное электроснабжение.

Выводы по разделу 1.

Химическое предприятие, специализирующееся на производстве упаковочных материалов и специализированных пластмасс, включает множество энергоёмких технологических процессов, таких как полимеризация, экструзия, синтез резины и переработка химических компонентов. Основные производственные цеха предприятия, включая цеха полимеризации, синтеза, переработки сырья и упаковки, требуют надёжного и непрерывного электроснабжения для работы высокотехнологичного оборудования, такого как компрессоры, нагреватели, экструдеры и автоматизированные линии.

Подстанция 110/6/6 кВ обеспечивает энергоснабжение основных цехов и различных потребителей, включая компрессоры, насосы, реакторы и системы охлаждения. Спроектированная инфраструктура должна учитывать специфические требования каждого цеха для обеспечения бесперебойной работы и энергоэффективности технологических процессов.

2 Разработка структурной и принципиальной схем подстанции

2.1 Структурная схема подстанции

Структурная схема подстанции составляется для общего представления конфигурации электрической сети, связанной с подстанцией, и её основных элементов. Она позволяет отобразить взаимосвязь между высоковольтным оборудованием, силовыми трансформаторами, распределительными устройствами и линиями электропередач. Основная цель схемы - предоставить общее видение структуры подстанции и связей её элементов для проектирования, эксплуатации и технического обслуживания.

На структурной схеме изображается:

- подключение высоковольтных линий (ЛЭП 110 кВ);
- вводы с первичного напряжения и трансформаторы;
- распределительные устройства 6 кВ.

Особенности электроснабжения предприятия:

- потребители 1-й категории (высокой надёжности) включают ключевое технологическое оборудование, отказы которого могут привести к значительным убыткам или остановке производства, такие как компрессоры, насосы реакторов и системы жизнеобеспечения;
- потребители 2-й категории (средней надёжности) — оборудование, технологические остановки которого допустимы на короткое время, например, вентиляционные системы или линии упаковки.

Подстанция является тупикового типа, что означает подключение через одну или две высоковольтные линии без транзитного прохождения энергии на другие объекты. Это повышает требования к надёжности схемы, поскольку в случае аварии на питающих линиях энергоснабжение подстанции полностью прекращается.

На чертежах структурная схема изображается упрощённо, с использованием стандартных условных обозначений. Высоковольтные линии, трансформаторы, шины и секции распределительного устройства обозначаются схематическими линиями и символами.

Структурная схема проектируемой подстанции 110/6/6 кВ представлена на рисунке 1.

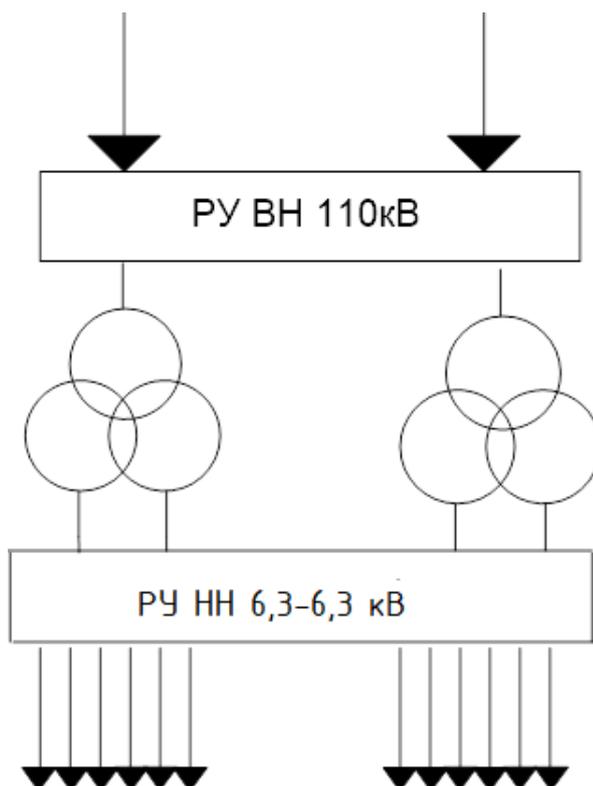


Рисунок 1 – Структурная схема ПС 110/6/6 кВ

«На ПС с двухобмоточными трансформаторами электроэнергия от энергосистемы поступает в РУ ВН, затем трансформируется и распределяется между потребителями в РУ НН» [4, 15].

2.2 Принципиальная схема подстанции

Принципиальная схема подстанции 110/6/6 кВ выполнена по типу 110-4Н «Мостик с выключателями в цепях трансформаторов с ремонтной перемычкой со стороны линий» [4]. Эта схема оптимально подходит для

тупиковых подстанций с двумя силовыми трансформаторами, обеспечивая надёжность электроснабжения потребителей 1-й и 2-й категорий.

Упрощенная схема типа 110-4Н «Мостик с выключателями в цепях трансформаторов с ремонтной перемычкой со стороны линий» [4] представлена на рисунке 2.

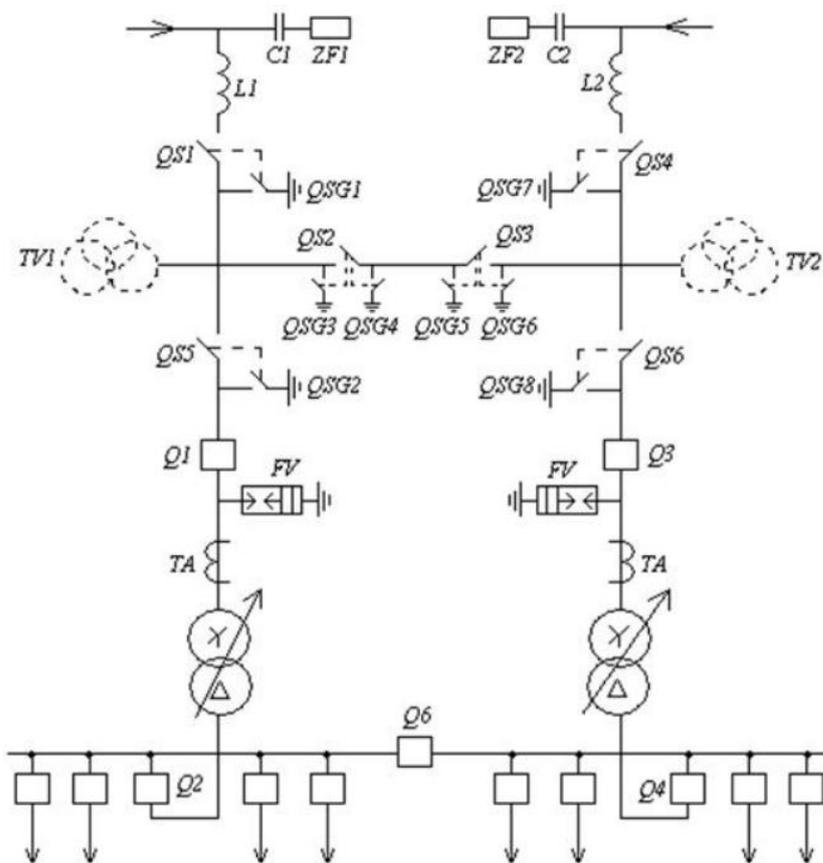


Рисунок 2 - Упрощенная схема типа 110-4Н «Мостик с выключателями в цепях трансформаторов с ремонтной перемычкой со стороны линий» [1]

Элементы принципиальной схемы:

- высоковольтные линии (ЛЭП 110 кВ) - две линии электропередач, обеспечивающие ввод электроэнергии на подстанцию;
- мостовая схема соединения - соединение линий через ремонтную перемычку, что позволяет выполнять ремонт одной линии без отключения трансформаторов;
- силовые трансформаторы - два трансформатора мощностью 25000 кВА понижающие напряжение с 110 кВ до 6 кВ;

- выключатели на стороне трансформаторов — для управления и защиты цепей трансформаторов;
- распределительные устройства 6 кВ - секции шин среднего напряжения для подключения нагрузки, включая потребителей 1-й и 2-й категорий;
- ремонтная перемычка со стороны линий — обеспечивает гибкость в эксплуатации и возможность переключения.

Преимущества схемы 110-4Н:

- высокая надёжность электроснабжения: мостовая схема с двумя линиями и ремонтной перемычкой позволяет снизить риск отключения потребителей при ремонте или аварии на одной из линий;
- гибкость эксплуатации: возможность переключения нагрузки между линиями и трансформаторами;
- поддержка потребителей 1-й категории: за счёт независимого питания от двух линий и трансформаторов повышается надёжность питания особо важных нагрузок.
- простота ремонта: ремонтная перемычка упрощает вывод оборудования в ремонт без необходимости полного отключения;
- экономичность: схема требует меньшего количества оборудования по сравнению с более сложными конфигурациями, такими как кольцевая схема.

Вывод по разделу 2

Структурная схема подстанции 110/6/6 кВ отражает её тупиковую конфигурацию и необходимость питания потребителей 1-й и 2-й категорий. Принципиальная схема с мостовым соединением и ремонтной перемычкой обеспечивает баланс между высокой надёжностью, гибкостью эксплуатации и экономичностью, что делает её оптимальным решением для данного химического предприятия.

3 Расчет электрических нагрузок и выбор силовых трансформаторов

3.1 Расчет электрических нагрузок

Расчет электрических нагрузок является ключевым этапом проектирования подстанции. Для обеспечения корректности расчетов и оптимального выбора оборудования используется метод коэффициента спроса. Этот метод позволяет учесть неполное использование всех потребителей одновременно и учесть специфику работы оборудования на предприятии.

Метод коэффициента спроса основывается на анализе номинальной установленной мощности потребителей и вероятности её использования. Формула расчета расчётной активной нагрузки выглядит следующим образом:

$$P_p = K_c \cdot P_n, \quad (1)$$

где P_p – расчётная активная мощность цеха (участка), кВт;

K_c – коэффициент спроса цеха (участка), о.е.» [3].

«Предполагаемая реактивная нагрузка объектов электропотребления, квар:

$$Q_p = P_p \cdot tg\varphi, \quad (2)$$

где Q_p – расчетная реактивная мощность цеха (участка), квар;

$tg\varphi$ – коэффициент реактивной мощности цеха (участка), о.е.» [5].

Полная нагрузка всего предприятия будет вычислена по следующей формуле:

$$S_{p.} = \sqrt{(P_{p.})^2 + (Q_{p.})^2}. \quad (3)$$

Преимущества метода коэффициента спроса:

- учет реального потребления (метод позволяет избежать завышения расчётных нагрузок за счёт применения коэффициентов спроса и активной мощности, что особенно актуально для промышленных объектов с переменным характером нагрузки);
- оптимизация оборудования (позволяет корректно выбрать трансформаторы, распределительные устройства и коммутационную аппаратуру);
- простота применения (метод требует минимального количества исходных данных и легко интегрируется в проектный процесс);
- экономическая эффективность (исключает избыточность проектирования и снижает затраты на установку оборудования).

Сравнение этого метода с другими методами расчета электрической нагрузки представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение различных методов расчета электрических нагрузок

Метод	Особенности	Недостатки
Коэффициента спроса	Учет неполной одновременной нагрузки, простота и гибкость.	Требует качественной оценки коэффициентов.
Метод средних нагрузок	Упрощает расчет при постоянных нагрузках.	Не учитывает пиковых нагрузок, что может привести к недостаточному резерву мощности.
Метод моделирования нагрузки	Использует сложные алгоритмы и учёт временных характеристик потребления.	Высокая сложность и длительность расчётов, требуются специализированные программные средства.

Метод коэффициента спроса является оптимальным для расчета нагрузок подстанции химического предприятия благодаря своей простоте, экономической эффективности и учету реальных условий эксплуатации

оборудования. Полученные расчётные значения позволяют рационально выбрать параметры трансформаторов и высоковольтного оборудования, обеспечив надежное и эффективное электроснабжение предприятия.

На предприятии присутствуют потребители 1-й и 2-й категорий, разбитые по основным цехам. Нагрузки, коэффициенты спроса и активной мощности сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Нагрузки, коэффициенты спроса и активной мощности

Цех/Потребитель	P_n , кВт	K_c	$\cos\varphi$
Цех полимеризации и экструзии	7000	0,85	0,9
Цех синтеза синтетической резины	5000	0,8	0,92
Цех производства полиуретанов	4500	0,75	0,95
Цех переработки растворителей	4000	0,7	0,9
Системы вентиляции и охлаждения	3000	0,9	0,85
Линии автоматизированной упаковки	2000	0,6	0,88
Цех подготовки и переработки сырья	6000	0,8	0,9
Цех упаковки и логистики	4000	0,65	0,88
Освещение и вспомогательные системы	2000	0,5	0,8
Итого	37500	-	-

Теперь при использовании рассмотренных ранее формул (1) - (3) выполняется расчет нагрузки на примере цеха полимеризации и экструзии:

$$P_p = 0,85 \cdot 7000 = 5950 \text{ кВт};$$

$$Q_p = 5950 \cdot 0,48 = 2856 \text{ квар};$$

$$S_p = \sqrt{5950^2 + 2856^2} = 6599,94 \text{ кВА}.$$

Эти значения можно использовать для проектирования системы электроснабжения.

Расчет по остальным потребителям предприятия проводится аналогично, результаты расчетов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчета электрических нагрузок

Цех/Потребитель	P_n , кВт	K_c	$\cos\varphi$	$tg\varphi$	P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА
Цех полимеризации и экструзии	7000	0,85	0,9	0,48	5950	2856	6599,94
Цех синтеза синтетической резины	5000	0,8	0,92	0,43	4000	1720	4354,12
Цех производства полиуретанов	4500	0,75	0,95	0,33	3375	1113,75	3554,02
Цех переработки растворителей	4000	0,7	0,9	0,48	2800	1344	3105,86
Системы вентиляции и охлаждения	3000	0,9	0,85	0,62	2700	1674	3176,83
Линии автоматизированной упаковки	2000	0,6	0,88	0,54	1200	648	1363,78
Цех подготовки и переработки сырья	6000	0,8	0,9	0,48	4800	2304	5324,32
Цех упаковки и логистики	4000	0,65	0,88	0,54	2600	1404	2954,86
Освещение и вспомогательные системы	2000	0,5	0,8	0,75	1000	750	1250
Итого	37500	-	-	-	28425	13813,75	31603,8

Итоговая расчётная полная мощность составляет 31603,8 кВА. Эта расчетная мощность будет учитываться при выборе силового трансформатора.

3.2 Выбор силовых трансформаторов

«С учетом мощности двух трансформаторов, мощность каждого трансформатора должна определяться по следующему условию [8]:

$$S_T \geq \frac{S_{\max}}{K_{3.н.}}, \quad (4)$$

$$S_T \geq \frac{31603,8}{1,4} = 22\,574,14 \text{ кВА,}$$

где $K_{з.н.}$ – «коэффициент приближенной допустимой аварийной перегрузки трансформатора» [9].

Для обеспечения надёжного электроснабжения химического предприятия с расчётной полной мощностью 31 603,8 кВА рекомендуется использовать два силовых трансформатора типа ТРДН-25000/110-6У1 [11].

Обоснование выбора:

- резервирование (использование двух трансформаторов по 25 000 кВА обеспечивает резервирование нагрузки и в случае выхода из строя одного из трансформаторов, второй сможет обеспечить электроснабжение наиболее важных потребителей);
- стандартный типоразмер (согласно [1], стандартная номинальная мощность силовых трансформаторов включает значение 25 000 кВА для класса напряжения 110 кВ);
- гибкость в эксплуатации (два трансформатора позволяют более гибко управлять нагрузкой, проводить плановые ремонты и техническое обслуживание без полного отключения потребителей).

Таким образом, установка двух трансформаторов по 25 000 кВА каждый обеспечит надёжное и эффективное электроснабжение предприятия, соответствуя требованиям стандартов и специфике производственных процессов.

Вывод по разделу 3

В результате расчета электрических нагрузок методом коэффициента спроса определена общая активная мощность предприятия, которая составляет 31 603,8 кВА.

На основании расчётной мощности выбраны два силовых трансформатора марки ТРДН-25000/110-6 с номинальной мощностью 25 000 кВА каждый.

4 Расчет токов короткого замыкания и выбор оборудования электрической части подстанции

4.1 Расчет токов короткого замыкания

Расчет токов короткого замыкания (КЗ) является важной частью проектирования электрических систем. Он необходим для выбора электротехнического оборудования (выключателей, трансформаторов, шинопроводов) и защиты, а также для обеспечения безопасности эксплуатации. В данном разделе выполняется расчет токов трёхфазного короткого замыкания в распределительной сети 110/6/6 кВ..

На рисунке 3 представлена схема расчета тока короткого замыкания и схема замещения.

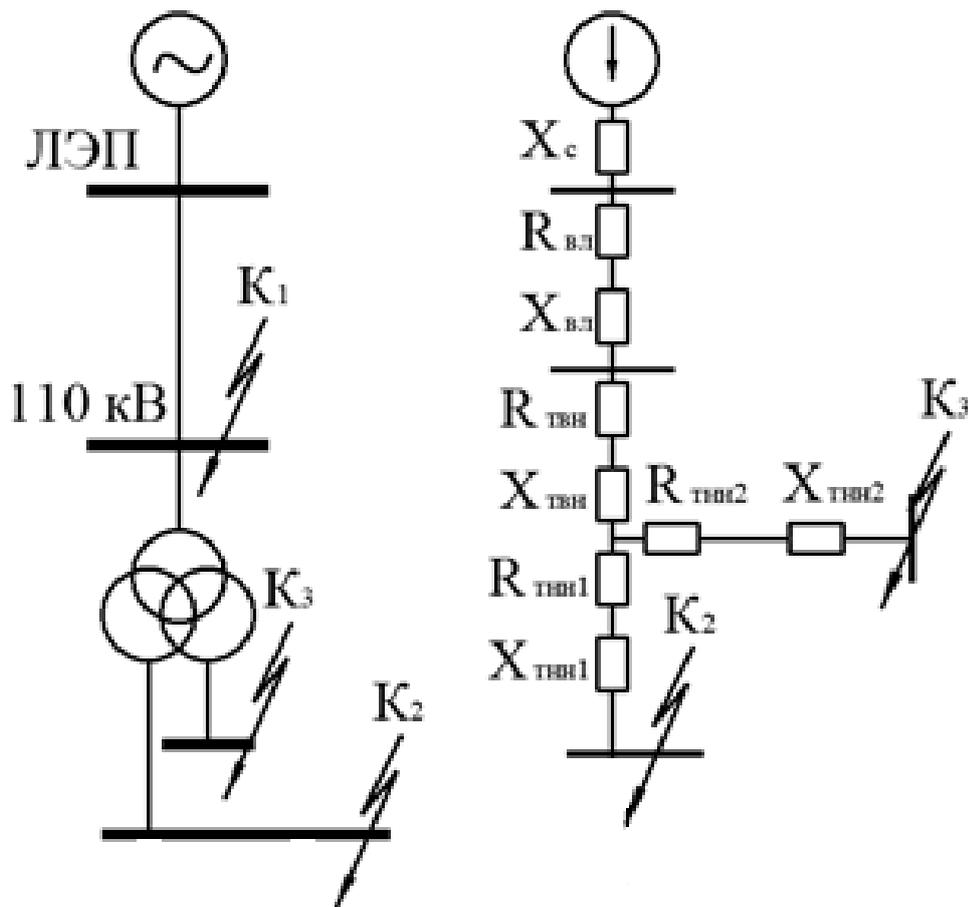


Рисунок 3 - Схема расчета тока короткого замыкания и схема замещения

Расчет токов короткого замыкания на стороне 110 кВ.

За базисные условия принимаются следующие величины: $S_B = 1000$ МВА; $U_B = 115$ кВ; $E_C = 1$.

Базисный ток равен [12]:

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_B}, \quad (5)$$
$$I_B = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 5.$$

Расчет токов короткого замыкания в точке К-1.

Сопротивление системы X_C принимается равным нулю [14].

Сопротивление воздушной линии от подстанции системы до ГПП микрорайона [13]:

$$x_L = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_B}{U_B^2}, \quad (6)$$
$$x_L = 0,4 \cdot 15 \cdot \frac{1000}{115^2} = 0,45.$$

Эквивалентное сопротивление цепи:

$$z_{\Sigma K1} = x_C + x_L, \quad (7)$$
$$z_{\Sigma K1} = 0 + 0,45 = 0,45.$$

«Начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания в точке К-1:

$$I_{\text{ПО}(K1)} = \frac{E_C''}{z_{\Sigma K1}} \cdot I_B, \quad (8)$$

$$I_{\text{ПО}(K1)} = \frac{1}{0,45} \cdot 5 = 11,1 \text{ кА.}$$

Ударный ток короткого замыкания [13]:

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{уд}} \cdot I_{\text{ПО}(K1)}, \quad (9)$$

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot 1,4 \cdot 11,1 = 21,98 \text{ кА.}$$

где $k_{\text{уд}}$ - ударный коэффициент» [13].

Расчет токов короткого замыкания на стороне 10 кВ.

За базисные условия принимаются следующие величины: $S_{\text{Б}} = 1000 \text{ МВА}$; $U_{\text{Б}} = 6,3 \text{ кВ}$; $E_{\text{С}} = 1$.

Базисный ток по выражению (8):

$$I_{\text{Б}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 91,6 \text{ кА.}$$

Расчет токов короткого замыкания в точке К-2.

Активное сопротивление трансформатора на высокой стороне:

$$r_{\text{ТВН}} = \frac{\Delta P_{\text{КЗ}} \cdot S_{\text{Б}} \cdot 10^3}{2S_{\text{Н}}^2}, \quad (10)$$

$$r_{\text{ТВН}} = \frac{120 \cdot 1000 \cdot 10^3}{2 \cdot 25000^2} = 0,096.$$

Активное сопротивление трансформатора на низкой стороне:

$$r_{\text{ТНН}} = \frac{\Delta P_{\text{КЗ}} \cdot S_{\text{Б}} \cdot 10^3}{2S_{\text{Н}}^2}, \quad (11)$$

$$r_{\text{ТНН}} = \frac{120 \cdot 1000 \cdot 10^3}{25000^2} = 0,19.$$

Реактивное сопротивление трансформатора на высокой стороне:

$$x_{ТВН} = 0,125 \cdot \frac{u_{КЗ\%} \cdot S_B \cdot 10^3}{100 \cdot S_H}, \quad (12)$$
$$x_{ТВН} = 0,125 \cdot \frac{10,5 \cdot 1000 \cdot 10^3}{100 \cdot 25000} = 0,525.$$

Реактивное сопротивление трансформатора на низкой стороне:

$$x_{ТНН} = 1,75 \cdot \frac{u_{КЗ\%} \cdot S_B \cdot 10^3}{100 \cdot S_H}, \quad (14)$$
$$x_{ТНН} = 1,75 \cdot \frac{10,5 \cdot 1000 \cdot 10^3}{100 \cdot 25000} = 7,35.$$

Результирующее сопротивление схемы замещения точки К2:

$$z_{\Sigma K2} = \sqrt{(x_{\Sigma K1} + x_{ТВН} + x_{ТНН})^2 + (r_{ТВН} + r_{ТНН})^2}, \quad (15)$$
$$z_{\Sigma K2} = \sqrt{(0,45 + 0,525 + 7,35)^2 + (0,096 + 0,19)^2} = 8,33.$$

Начальное значение периодической составляющей короткого замыкания в точке К2 по формуле (8):

$$I_{ПО(К2)} = \frac{1}{8,33} \cdot 91,6 = 11 \text{ кА.}$$

Ударный ток по формуле (9):

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot 1,35 \cdot 11 = 21 \text{ кА.}$$

Все результаты расчетов тока короткого замыкания сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Токи короткого замыкания

Точка КЗ	Описание	$U_{НОМ}, \text{кВ}$	$I_{ПО}, \text{кА}$	$i_{уд}, \text{кА}$
К1	Линейные выводы ВН трансформатора	110	11,1	21,98
К2	Секция шин НН трансформатора	6	11	21

Ток короткого замыкания на стороне НН составляет 11 кА, а на стороне ВН – 11,1 кА. Эти значения используются для выбора коммутационного оборудования, кабелей и настройки защит.

4.2 Выбор оборудования электрической части подстанции

Выбор оборудования для подстанции 110/6/6 кВ включает определение номинальных характеристик выключателей и разъединителей на основании расчётных токов и условий эксплуатации. Основные параметры оборудования определяются по номинальным токам трансформатора с учётом допустимой перегрузки, токам короткого замыкания, тепловому импульсу и характеристикам защиты.

«Для определения наибольших рабочих токов электроустановки учитываются вероятные перегрузки в ремонтных и послеаварийных режимах.

Ток, протекающий на рассматриваемой стороне трансформатора, определим по формуле:

$$I_{\text{макс}} = \frac{1,4 \cdot S_{\text{н.т.}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н}}}, \quad (16)$$

где $S_{\text{н.т.}}$ - номинальная мощность трансформатора, кВА;

$U_{\text{н}}$ - номинальное напряжение стороны трансформатора, кВ» [17].

Наибольшие рабочие токи на стороне ВН и НН подстанции:

$$I_{\text{макс110}} = \frac{1,4 \cdot 25000}{\sqrt{3} \cdot 110} = 183,7 \text{ А};$$

$$I_{\text{макс6}} = \frac{1,4 \cdot 25000}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 6} = 1684 \text{ А}.$$

Выбор выключателей и разъединителей

«К выключателям высокого напряжения предъявляются следующие требования: надежное отключение токов любой величины – от десятков ампер до номинального тока отключения; быстрота действия, то есть наименьшее время отключения; пригодность для автоматического повторного включения, то есть быстрое включение сразу после отключения; удобство ревизии и осмотра контактов и механической части; взрыво- и пожаробезопасность; удобство транспортировки и обслуживания.

Выбор выключателей осуществляется по следующим параметрам:

- напряжению установки;
- длительному току;
- по включающей способности, и по отключающей способности;
- по электродинамической стойкости, и по термической стойкости» [1].

«На термическую стойкость выключатель проверяется по тепловому импульсу тока КЗ:

$$B_{\text{к}} \leq I_{\text{ном.терм}}^2 t_{\text{ном.терм}}. \quad (17)$$

Тепловой импульс тока КЗ, определяется по формуле:

$$B_{\text{к}} = I_{\text{п0}}^2 (t + T_{\text{а}}), \quad (18)$$

$$t = t_{\text{рз}} + t_{\text{пов}}, \quad (19)$$

где $I_{\text{п0}}$ – величина тока короткого замыкания, кА;

t – время отключения тока короткого замыкания, с;

T_a - постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока короткого замыкания [17];

$t_{рз}$ - время срабатывание релейной защиты, с [17];

$t_{пов}$ - время полного отключения выключателя, с» [19].

Тогда время отключения КЗ:

$$t = 1 + 0,035 = 1,035 \text{ с.}$$

Тепловой импульс тока КЗ равен:

$$B_k = 11,1^2 (1,035 + 0,05) = 133,7 \text{ кА}^2 \cdot \text{с.}$$

«Для проверки возможности отключения выключателем аperiodической составляющей тока КЗ необходимо определить номинальное допустимое значение аperiodической составляющей в отключаемом токе для времени τ .

$$i_{a.ном} = \sqrt{2} I_{ном.откл} \beta_{ном}, \quad (20)$$

$$i_{a.ном} = \sqrt{2} \cdot 40 \cdot 0,4 = 22,63 \text{ кА,}$$

где $\beta_{ном}$ - нормированное значение аperiodической составляющей в отключаемом токе.

Аperiodическая составляющая тока КЗ в момент расхождения контактов:

$$i_{ат} = \sqrt{2} I_{п0} e^{-\frac{\tau}{T_a}}, \quad (21)$$

$$i_{ат} = \sqrt{2} \cdot 11,1 \cdot e^{-\frac{0,045}{0,05}} = 6,382 \text{ кА.}$$

где τ - наименьшее время от начала К.З. до момента расхождения дугогасительных контактов, с» [18].

Выбор выключателя для напряжения 110 кВ представлен в таблице 5.

Таблица 5 - Результаты выбора выключателя 110 кВ.

Условия выбора	Каталожные данные	Расчетные данные
$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{ном.сети}}$	110 кВ	110 кВ
$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{макс}}$	2500 А	183,7 А
$I_{\text{п.скв}} \geq I_{\text{п0}}$	40 кВ	11,1 кА
$i_{\text{п.скв}} \geq i_{\text{уд}}$	102 кА	21,98 кА
$I_{\text{ном.откл}} \geq I_{\text{пт}}$	40 кА	11,1
$i_{\text{а.ном}} \geq i_{\text{ат}}$	22,63 кА	6,382
$B_{\text{к}} \leq I_{\text{ном.терм}}^2 t_{\text{ном.терм}}$	4800 кА ² ·с	133,7 кА ² ·с

По итогам проверки выбраны элегазовые выключатели ВГТ-110-40/2500У1 [7].

Как выглядит выключатель ВГТ-110, изображено на рисунке 4.



Рисунок 4 – Внешний вид выключателя ВГТ-110

Выбор выключателей на стороне 6 кВ выполняется аналогично, результаты расчетов представлены в таблице 6.

Таблица 5 - Результаты выбора выключателя 6 кВ.

Условия выбора	Каталожные данные	Расчетные данные
$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{ном.сети}}$	10 кВ	6 кВ
$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{макс}}$	2000 А	1684 А
$I_{\text{п.скв}} \geq I_{\text{п0}}$	20 кВ	11 кА
$i_{\text{п.скв}} \geq i_{\text{уд}}$	51 кА	21 кА
$I_{\text{ном.откл}} \geq I_{\text{пт}}$	20 кА	11
$i_{\text{а.ном}} \geq i_{\text{ат}}$	11,31 кА	6,325
$B_{\text{к}} \leq I_{\text{ном.терм}}^2 t_{\text{ном.терм}}$	1200 кА ² ·с	131,3 кА ² ·с

По итогам проверки выбраны выключатели ВВМ-СЭЩ -3-10-20/2000 УХЛ1.

Как выглядит выключатель ВГТ-110, изображено на рисунке 4.

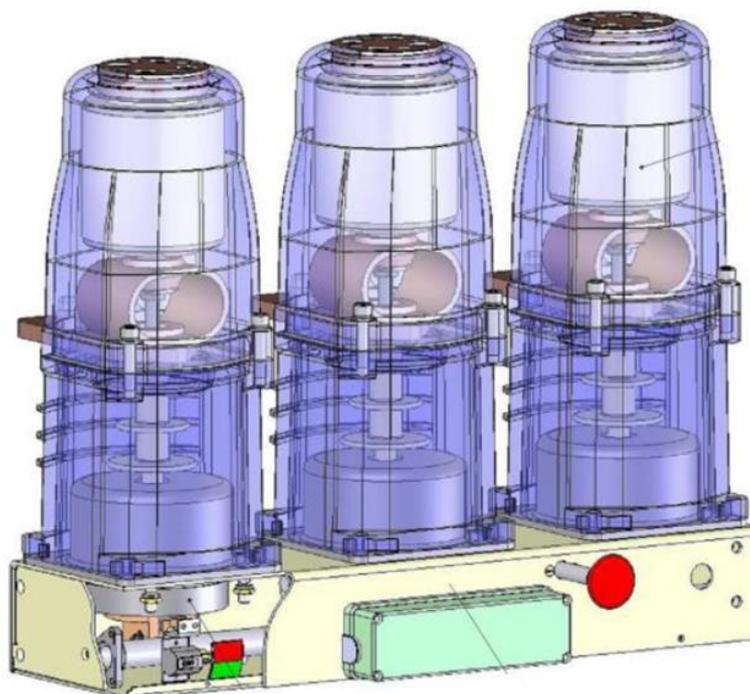


Рисунок 5 – Внешний вид выключателя ВВМ-СЭЩ -3-10-20/1000 УХЛ1

Выбор разъединителей 110 кВ

Основные функции разъединителя:

- обеспечение видимого разрыва цепи;
- разделение участков сети;

- защита и резервирование;
- повышение безопасности;
- подключение и отключение оборудования под напряжением без нагрузки.

Итоги расчета параметров и их сопоставление с номинальными величинами приведены в таблице 6.

Таблица 6 - Выбор разъединителей 110 кВ

Условия выбора	Каталожные данные	Расчетные данные
$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{ном.сети}}$	110 кВ	110 кВ
$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{макс}}$	1000 А	183,7 А
$i_{\text{п.скв}} \geq i_{\text{уд}}$	80 кА	21,98 кА
$B_{\text{к}} \leq I_{\text{ном.терм}}^2 t_{\text{ном.терм}}$	3000 кА ² ·с	133,7 кА ² ·с

В конечном итоге выбираются двухколонковые разъединители типов РНДЗ.1-110/1000У1 и РНДЗ.2-110/1000У1.

Выбор трансформатора тока 110 кВ

Трансформатор тока (ТТ) является важным элементом подстанции, обеспечивающим измерение токов, а также передачу сигнала на устройства релейной защиты и автоматики. Для установки на стороне 110 кВ подстанции предлагается трансформатор тока типа ТФЗМ-110-У1.

Ниже приводится методика проверки трансформатора тока.

По напряжению установки [6]:

$$U_{\text{н.ТТ}} \geq U_{\text{н.сети}}, \quad (22)$$

где $U_{\text{н.сети}}$, - номинальное напряжение сети, кВ;

$U_{\text{н.ТТ}}$ – номинальное напряжение ТТ, кВ.

По току:

$$I_{1\text{н}} \geq I_{\text{раб.макс}}, \quad (23)$$

где $I_{1н.}$ - номинальный ток ТТ, кА;

$I_{раб.мах}$ - максимальный рабочий ток.

По электродинамической стойкости:

$$i_{уд} \leq i_{дин}, \quad (24)$$

где $i_{уд}$ - ударный ток КЗ в цепи ТТ, кА;

$i_{дин}$ - наибольший пик тока электродинамической стойкости, кА.

По термической стойкости:

$$B_k \leq I_{тер.}^2 \cdot t_{тер.}, \quad (25)$$

По вторичной нагрузки:

$$Z_n \geq Z_{2\Sigma}, \quad (26)$$

где $Z_{2\Sigma}$ – сопротивление вторичной нагрузки, Ом:

Результаты испытаний трансформаторов тока в местах расположения питающих аппаратов приведены в таблице 7.

Таблица 7 - Результаты испытаний трансформаторов тока 110 кВ

Условия выбора	Каталожные данные	Расчетные данные
$U_{н.ТТ.} \geq U_{н.сети,}$	110 кВ	110 кВ
$I_{1н.} \geq I_{раб.мах}$	200 А	183,7 А
$Z_n \geq Z_{2\Sigma}$	1,2 Ом	0,88 Ом
$i_{уд} \leq i_{дин}$	82 кА ² ·с	21,98 кА ² ·с
$B_k \leq I_{тер.}^2 \cdot t_{тер.}$	192кА ²	133,7 кА ² ·с

Внешний вид трансформатора ТФЗМ-110-У1 показан на рисунке 6.



Рисунок 6 – Внешний вид трансформатора ТФЗМ-110-У1

Выбор трансформаторов тока на 6 кВ

«Для измерений и учета электрической энергии на стороне 6 кВ принимается цифровой мультиметр щитового исполнения марки ДМТМЕ-96.

Для установки на стороне 6 кВ подстанции предлагается трансформатор тока типа ТОЛ – СЭЩ – 10» [13].

Испытания трансформатора тока для сети 6 кВ проводятся так же, как и для сети 110 кВ. Результаты испытаний представлены в таблице 8.

Таблица 8 - Результаты испытаний трансформаторов тока 10 кВ

Условия выбора	Каталожные данные	Расчетные данные
$U_{н.ТТ.} \geq U_{н.сети,}$	10 кВ	6 кВ
$I_{1н.} \geq I_{раб.мах}$	2000 А	1684 А
$Z_{н} \geq Z_{2\Sigma}$	0,462 Ом	0,292 Ом
$i_{уд} \leq i_{дин}$	80 кА ² ·с	21,98 кА ² ·с
$B_{к} \leq I_{гер.}^2 \cdot t_{гер.}$	192кА ²	131.1 кА ² ·с

На рисунке 7 показан внешний вид заданного трансформатора.



Рисунок 7 – Внешний вид трансформатора ТОЛ – СЭЩ – 10

Выбор трансформатора напряжения 110 кВ

«Трансформаторы напряжения (ТН) предназначены для понижения высокого напряжения до стандартного значения, пригодного для измерительных приборов, релейной защиты и автоматики. Они обеспечивают изоляцию между высоковольтной сетью и низковольтными цепями измерения и защиты, что гарантирует безопасность персонала и оборудования» [6].

По аналогии с выбором трансформаторов тока, для проверки на соответствие классу точности, необходимо определить расчетную нагрузку во вторичной цепи $S^2_{\text{расч.}}$.

При этом должно быть соблюдено следующее условие [6]:

$$S_{\text{доп}} \geq S_{2\Sigma} \quad (27)$$

Мощность приборов измерения и измерительной системы аналогична мощности цифрового мультиметра панельного типа. Значит, вторичная нагрузка трансформатора напряжения составляет: $S_{2\Sigma} = 6 \text{ ВА}$.

Для установки в сети 110 кВ используется трансформатор НАМИ -110.

Результаты испытаний трансформаторов напряжения приведены в таблице 9.

Таблица 9 - Результаты испытаний трансформаторов напряжения 110 кВ

Условия выбора	Каталожные данные	Расчетные данные
$U_{\text{н.тг.}} = U_{\text{н.сети,}}$	110 кВ	110 кВ
$S_{\text{доп}} \geq S_{2\Sigma}$	200 ВА	6 ВА

Внешний вид выбранного трансформатора показан на рисунке 8.



Рисунок 8 – Внешний вид НАМИ - 110

Преимущества НАМИ-110:

- высокая точность измерений (обеспечивает надежную работу измерительных приборов и систем учета электроэнергии);

- надежность и долговечность (конструкция рассчитана на длительный срок эксплуатации в различных климатических условиях);
- безопасность (высокая степень изоляции предотвращает риски электротравм и повреждения оборудования);
- многофункциональность (наличие нескольких вторичных обмоток позволяет одновременно подключать измерительные приборы, устройства релейной защиты и автоматики).

Выбор трансформатора напряжения на 6 кВ

Для установки в сети 6 кВ используется трансформатор ЗНОЛ - СЭЦ 10 - УХЛ1 [2].

Результаты испытаний трансформаторов напряжения приведены в таблице 10.

Таблица 10 - Результаты испытаний трансформаторов напряжения 6 кВ

Условия выбора	Каталожные данные	Расчетные данные
$U_{н.ТТ} > U_{н.сети}$,	10 кВ	6 кВ
$S_{доп} \geq S_{2\Sigma}$	25 ВА	6 ВА

Внешний вид выбранного трансформатора показан на рисунке 9.



Рисунок 9 – Внешний вид ЗНОЛ – СЭЦ 10

Преимущества ЗНОЛ-СЭЩ 10-УХЛ1:

- компактность (идеально подходит для установки в КРУ благодаря малым габаритам);
- безопасность (сухое исполнение исключает риск утечки масла и связанных с этим опасностей);
- устойчивость к перепадам температуры (климатическое исполнение УХЛ1 обеспечивает работоспособность в широком диапазоне температур);
- надежность (высокая механическая прочность и устойчивость к электрическим перегрузкам).

Выбор трансформатора напряжения НАМИ-110 для сети 110 кВ и ЗНОЛ-СЭЩ 10-УХЛ1 для сети 6 кВ является оптимальным решением для подстанции 110/6/6 кВ химического предприятия. Эти трансформаторы обеспечивают высокую точность измерений, надежную работу релейной защиты и автоматики, а также соответствуют требованиям безопасности и долговечности. Их использование позволит обеспечить эффективное и безопасное электроснабжение предприятия, учитывая специфику его технологических процессов и требования к надежности.

Выбор ОПН

Ограничитель перенапряжений нелинейный (ОПН) - это электротехнический аппарат, предназначенный для защиты изоляции оборудования и линий электропередач от переходных перенапряжений, возникающих вследствие грозовых ударов или коммутационных операций. ОПН снижает перенапряжение до безопасного уровня, поглощая избыточную энергию.

Состав и конструкция ОПН:

- нелинейные варисторы (основной элемент);
- корпус (изготовлен из фарфора или полимерных материалов, обеспечивает защиту варисторов от внешних воздействий);

- изоляция (наружные ребра увеличивают путь утечки и обеспечивают устойчивость к загрязнениям и осадкам);
- контактные элементы (обеспечивают электрический контакт с сетью и заземлением).

«Чтобы определить расчётную величину рабочего напряжения ограничителей необходимо знать расчётную величину максимального допустимого на ограничителе напряжения $U_{н.р.}$, которое для сетей 110 кВ определяется по формуле:

$$U_{н.р.} = 1,05 \cdot U_{ном.сети}, \quad (28)$$

$$U_{н.р.} = 1,05 \cdot 110 = 115,5 \text{ кВ.}$$

Время действия повреждения (время действия релейной защиты) составляет – 0,5 сек. В соответствии с этим коэффициент K_B , учитывающий увеличение величины допустимого напряжения за счет сокращения кратности воздействия на ОПН исходя из условий теплового баланса, имеет значение равное 1,52.

Расчетная величина длительного допустимого напряжения на ограничителе определяется по формуле:

$$U_{р.н.р.} = \frac{U_{н.р.}}{K_B}, \quad (29)$$

$$U_{р.н.р.} = \frac{115,5}{1,52} = 75,97 \text{ кВ.}$$

В соответствии с допустимым длительным напряжением выбирается ОПН–110/100.

При выборе ограничителя перенапряжений за основу берется энергия, поглощаемая ограничителем, которая предварительно определяется по приведенной ниже формуле:

$$\mathcal{E} = \frac{U - U_{\text{ост.}}}{Z} \cdot U_{\text{ост.}} \cdot 2T \cdot n, \quad (30)$$

где U - величина неограниченных перенапряжения, кВ;

$U_{\text{ост.}}$ - остающееся напряжение на ограничителе, кВ;

Z - волновое сопротивление линии, Ом;

T - время распространения волны;

n - количество последовательных токовых импульсов.

Величину U допускается рассчитать по следующему выражению:

$$U = \frac{U_0}{1 + k \cdot l \cdot U_0}, \quad (31)$$

$$U = \frac{900}{1 + 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 900} = 762,7 \text{ кВ},$$

где U_0 - напряжение волны перенапряжений в месте ее возникновения;

k - коэффициент полярности;

l - длина защищенного подхода.

Время распространения волны:

$$T = \frac{l}{\beta \cdot c}, \quad (32)$$

$$T = \frac{3}{0,91 \cdot 300000} \cdot 10^6 = 0,9 \text{ мкс.}$$

где β - коэффициент затухания волны;

c - скорость распространения волны.

В результате поглощенная энергия равна:

$$\mathcal{E} = \frac{661,765 - 263}{470} \cdot 263 \cdot 2 \cdot 0,9 \cdot 2 = 803,3 \text{ кДж.}$$

Удельная энергоемкость:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}^* &= \frac{\mathcal{E}}{U_{\text{ном.сети}}}, \\ \mathcal{E}^* &= \frac{803,3}{110} = 7,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кВ}}. \end{aligned} \quad (33)$$

На основе вышеприведенных расчетов допускается для монтажа принять ОПН–110/100-10(І) – УХЛ» [13].

Аналогично проводится выбор ОПН для других распределительных устройств, итоги выбора ОПН сведены в таблицу 11.

Таблица 11 – Принятые к установки ОПН

Место установки	Марка ОПН
ОРУ 110 кВ	ОПН–110/100-10(І) – УХЛ
КРУ 6 кВ	ОПН-6 УХЛ1

Выбранные ОПН обеспечат надёжную защиту оборудования подстанции от грозовых и коммутационных перенапряжений, повышая её надёжность и долговечность.

Выбор трансформаторов собственных нужд

Для подстанции 110/6/6 кВ в качестве трансформаторов собственных нужд выбраны трансформаторы марки ТСЛ-СЭЦ. Эти трансформаторы предназначены для питания оборудования подстанции, обеспечивающего её работу, включая системы охлаждения, подогрев выключателей, освещение и другие вспомогательные нагрузки.

Нагрузка собственных нужд включает следующие основные потребители:

- охлаждение трансформаторов (вентиляторы, насосы системы охлаждения);

- подогрев выключателей (нагреватели в выключателях для предотвращения конденсации);
- освещение (внутреннее и наружное освещение подстанции);
- система релейной защиты и автоматики (источники питания цепей управления);
- дополнительные нагрузки (розетки для обслуживания, аварийные системы и другое оборудование).

Примерная нагрузка потребителей обобщена в таблице 12.

Таблица 12 – Ориентировочная нагрузка потребителей СН

Нагрузка	P , кВт	Q , кВар	S , кВА
Охлаждение трансформаторов	15	9,9	17,78
Подогрев выключателей	10	4,84	11,15
Освещение	8	6	10
Релейная защита и автоматика	5	1,64	5,26
Дополнительные нагрузки	12	7,15	13,87
Итого	50	29,53	58,06

При коэффициенте 0,8 расчетная нагрузка на вспомогательное оборудование будет следующей [10]:

$$S_{\text{расч}} = 0,8 \cdot 58,06 = 46,45 \text{ кВА.}$$

На основании полученного расчета к установке принимаются два трансформатора ТСЛ-СЭЩ мощностью 63 кВА каждый.

Преимущества:

- экологичность (отсутствие масла исключает риск загрязнения окружающей среды);

- надёжность (высокая устойчивость к перегрузкам и коротким замыканиям);
- долговечность (длительный срок службы благодаря прочной конструкции и защите обмоток);
- компактность (удобен для установки внутри помещений подстанции);
- безопасность (отсутствие горючих материалов снижает риск возгорания);
- экономичность (низкие эксплуатационные затраты благодаря минимальному обслуживанию).

Внешний вид выбранного трансформатора показан на рисунке 10.



Рисунок 10 – Внешний вид ТСЛ-СЭЩ мощностью 63 кВА

«Трансформатор ТСЛ-СЭЩ-63/6 оптимально подходит для питания собственных нужд подстанции. Его мощность позволяет покрыть текущую нагрузку с запасом, а конструктивные особенности обеспечивают высокую надёжность и безопасность в эксплуатации. Нагрузка собственных нужд

рассчитана с учётом всех потребителей, что позволяет гарантировать стабильную работу подстанции даже при повышении нагрузки в будущем» [2].

Выбор комплектных распределительных устройств

Комплектное распределительное устройство (КРУ) - это сборный электрораспределительный комплекс, состоящий из нескольких функциональных модулей (ячей), предназначенный для приёма и распределения электрической энергии среднего напряжения (6–10 кВ), защиты оборудования от коротких замыканий и перегрузок, а также для управления электрическими сетями.

КРУ применяется для:

- распределения электроэнергии (передача и распределение электроэнергии на подключенные потребители);
- защиты оборудования (автоматическое отключение при аварийных режимах, таких как короткие замыкания и перегрузки);
- управления (включение и отключение нагрузки, управление линиями и трансформаторами);
- контроля (мониторинг состояния сети через установленные измерительные приборы и устройства автоматики).

Распределительные устройства серии К-59 были выбраны для установки на стороне 6 кВ подстанции благодаря их высокой надежности и универсальности.

КРУ К-59 состоит из нескольких функциональных ячеек, каждая из которых выполняет определённую задачу: вводная ячейка, секционная ячейка, линейная ячейка, ячейка трансформатора собственных нужд, контрольно-измерительные приборы.

Внешний вид выбранного КРУ показан на рисунке 11.



Рисунок 11 – Внешний вид КРУ - 59

Правила монтажа КРУ

КРУ устанавливается в закрытых помещениях с контролируемыми климатическими условиями (температура и влажность). Основание должно быть ровным и способным выдерживать вес устройства. Каждая ячейка КРУ должна быть надёжно заземлена для предотвращения поражения электрическим током. Токоведущие элементы соединяются с кабелями или шинами, используя специальные изолирующие муфты. Перед вводом в эксплуатацию проверяются реле и автоматические выключатели, а также настройки защиты. Проводится комплексное испытание устройства, включая проверку работы в аварийных режимах.

КРУ серии К-59 оптимально подходит для распределения электроэнергии на стороне 6 кВ подстанции. Его компактность, надёжность, безопасность и модульность обеспечивают эффективную работу подстанции и упрощают эксплуатацию. КРУ выполнено в прочном металлическом корпусе, обеспечивая защиту от внешних воздействий, и полностью соответствует современным требованиям к оборудованию для среднего напряжения.

Выводы по разделу 4

Расчет токов короткого замыкания и выбор оборудования позволили подобрать оптимальную конфигурацию подстанции 110/6/6 кВ, которая обеспечивает надёжное и безопасное электроснабжение. Использование современных аппаратов, таких как ВМТ-110, КРУ К-59, ТСЛ-СЭЩ-100/6, ТФЗМ-110-У1 и других, позволяет гарантировать высокую эксплуатационную надёжность, удобство обслуживания и соответствие требованиям современных стандартов.

5 Разработка РЗА подстанции

Система релейной защиты и автоматики (РЗА) подстанции предназначена для предотвращения повреждений оборудования, повышения надёжности работы и минимизации времени отключения в аварийных режимах. Для подстанции 110/6/6 кВ применяются современные микропроцессорные устройства и комплексные решения для защиты силовых трансформаторов, линий электропередач и оборудования.

Для обеспечения безопасности и надёжности работы подстанции применяются следующие виды защит [1]:

- максимальная токовая защита (МТЗ);
- газовая защита трансформатора;
- защита от перегрузки;
- контроль температуры масла.

Максимальная токовая защита (МТЗ): устанавливается на стороне 110 кВ и 6 кВ, срабатывает при превышении заданного порога тока, может дополняться пуском по напряжению для увеличения чувствительности.

Газовая защита трансформатора: обеспечивает быстрое отключение трансформатора при внутренних повреждениях, сопровождающихся выделением газа в баке (например, при пробое изоляции), работает на сигналы от газового реле, срабатывает мгновенно.

Защита от перегрузки: устанавливается на стороне 110 кВ и 6 кВ для защиты трансформаторов от длительных перегрузок, отключает трансформатор при длительном превышении допустимой мощности.

Контроль температуры масла: обеспечивает сигнализацию и отключение трансформатора при перегреве масла, контролируя температуру с помощью термометров и датчиков температуры.

Для силовых трансформаторов подстанции применяется комплексная защита на основе устройства «Сириус-Т», обеспечивающая высокую чувствительность и гибкость настроек.

«Сириус-Т» - это микропроцессорное устройство релейной защиты, предназначенное для комплексной защиты силовых трансформаторов. Оно обеспечивает автоматическое отключение трансформаторов при аварийных режимах и предупреждает повреждение оборудования [20].

Область применения:

- силовые трансформаторы различной мощности в сетях 110–6 кВ;
- генераторы и автотрансформаторы;
- промышленные подстанции и энергосистемы.

Принцип действия:

- микропроцессорная обработка сигналов (устройство анализирует входные токовые и напряженческие сигналы, сравнивая их с заданными уставками);
- цифровая фильтрация (обеспечивает высокую точность обработки сигналов даже при наличии шумов или нестабильности сети);
- автоматическое отключение (при выявлении аварийных режимов «Сириус-Т» подаёт сигнал на отключение трансформатора).

Расчет максимальной токовой защиты на стороне 110 кВ

Ток срабатывания защиты [18]:

$$I_{сз} = \frac{K_H}{K_B} \cdot I_{ном}, \quad (34)$$

где K_H - коэффициент надежности, обеспечивающий отстройку защиты путем учета погрешности реле [1];

K_B - коэффициент возврата реле [1].

Ток срабатывания МТЗ:

$$I_{сз} = \frac{1,2}{0,8} \cdot 125,5 = 188,25 \text{ А}$$

Ток срабатывания реле:

$$I_{CP} = \frac{I_{C3} \cdot \sqrt{3}}{K_{IY}}, \quad (35)$$
$$I_{CP} = \frac{188,25 \cdot \sqrt{3}}{200/5} = 81,5 \text{ A.}$$

Коэффициент чувствительности:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{K3MIN}^{(3)}}{I_{CP} \cdot K_{\text{CX}}} \geq 1,5, \quad (36)$$
$$K_{\text{ч}} = \frac{11100}{81,5} \geq 1,5.$$

Расчет максимальной токовой защиты на стороне 6 кв

Максимальная токовая защита выполняется с комбинированным пуском напряжения (блокировкой по напряжению).

Ток срабатывания МТЗ:

$$I_{C3} = \frac{1,2}{0,8} \cdot 2291 = 3436,5 \text{ A}$$

Ток срабатывания реле:

$$I_{CP} = \frac{3436,5 \cdot 1}{3000/5} = 5,73 \text{ A.}$$

Коэффициент чувствительности:

$$K_{\text{ч}} = \frac{11000 \cdot 0,87}{3436} \geq 1,5.$$

«Релейная защита от перегрузки на стороне 6 кВ выполняется действием на сигнал посредством одного токового реле. Чтобы избежать излишних сигналов при КЗ и кратковременных перегрузках, в схеме РЗ предусматривается реле времени, обмотка которого должна быть рассчитана на длительное прохождение тока. Ток срабатывания реле защиты от перегрузки определяется по формуле» [1]:

$$I_{с.з} = \frac{K_{отс}}{K_B} \cdot I_{ном}, \quad (37)$$

$$I_{с.з} = \frac{1,2}{0,8} \cdot 2291 = 3436,5\text{А.}$$

Токи срабатывания реле защит:

$$I_{с.р} = \frac{I_{с.з} \cdot K_{сх}}{K_{IY}}, \quad (38)$$

$$I_{с.р} = \frac{3436,5 \cdot 1}{3000/5} = 5,73\text{А.}$$

Вывод по разделу 5

Применение современных систем защиты, таких как «Сириус-Т», максимальная токовая защита и газовая защита, обеспечивает надёжную защиту оборудования подстанции от аварийных режимов. Комплексная защита трансформаторов позволяет минимизировать риски повреждения оборудования, а также повысить надёжность и безопасность работы подстанции. Интеграция этих решений в систему АСУ ТП упрощает управление и эксплуатацию подстанции.

6 Расчет заземления и молниезащиты

6.1 Расчет заземления

Система заземления подстанции 110/6/6 кВ предназначена для обеспечения безопасности эксплуатации, защиты оборудования от повреждений и уменьшения переходного напряжения при коротких замыканиях. Основной задачей расчёта заземления является выбор параметров заземляющего устройства (ЗУ), таких как сопротивление заземления, форма и расположение заземляющих электродов, а также оценка их эффективности.

«Контур заземлителя сетки, расположенной с выходом за границы оборудования по 1,5 м (для того чтобы человек при прикосновении к оборудованию не смог находиться за пределами заземлителя)» [16].

«Площадь использования под заземлитель:

$$S = (A + 2 \cdot 1,5) \cdot (B + 2 \cdot 1,5), \quad (39)$$
$$S = (90 + 2 \cdot 1,5) \cdot (54 + 2 \cdot 1,5) = 5300 \text{ м}^2.$$

Диаметр горизонтальных и вертикальных проводников в сетке выполненных в виде прутков принимается диаметром равным 20 мм.

Проверка сечения по условиям механической прочности:

$$F_{\text{м.п.}} = \pi \cdot R^2, \quad (40)$$
$$F_{\text{м.п.}} = \pi \cdot 10^2 = 314,16 \text{ мм}^2.$$

Проверка на термическую стойкость:

$$F_{\text{т.с.}} = \sqrt{\frac{I_{\text{молн}}^2 \cdot T}{400 \cdot \beta}}, \quad (41)$$

$$F_{Т.С.} = \sqrt{\frac{60^2 \cdot 10^6 \cdot 0,15}{400 \cdot 21}} = 253,54 \text{ мм}^2.$$

где T - время срабатывания РЗ при его отключении;

β - коэффициент термической стойкости.

Проверка сечения на коррозионную стойкость:

$$F_{кор} = \pi \cdot S_{ср} \cdot (d + S_{ср}), \quad (42)$$

$$F_{кор} = 3,14 \cdot 0,102 \cdot (20 + 0,102) = 6,4 \text{ мм}^2.$$

Сечение горизонтальных проводников должно удовлетворять условию:

$$F_{М.П.} \geq F_{min} \geq F_{кор} + F_{Т.С.}, \quad (43)$$

$$F_{М.П.} = 314,16 \geq F_{min} = 259,92 \text{ мм}^2.$$

Диаметр прута принимается 20 мм, расстояние между полосами сетки – 6 м.

Общая длина полос в сетке:

$$L_{\Gamma} = \frac{2 \cdot S}{l_{п-п}}, \quad (44)$$

$$L_{\Gamma} = \frac{2 \cdot 5300}{6} = 1766 \text{ м.}$$

Уточняется длина горизонтальных полос при представлении площади подстанции квадратичной моделью со стороной \sqrt{S} .

В этом случае число ячеек:

$$m = \frac{L_{\Gamma}}{2 \cdot \sqrt{S}} - 1, \quad (45)$$

$$m = \frac{1766}{2 \cdot \sqrt{5300}} - 1 = 11.13.$$

Принимается: $m = 11$.

Длина стороны ячейки 7 м.

При этом должно соблюдаться условие:

$$\begin{aligned} 1,25 \leq a \leq 40, \\ 0,25 \leq 6.618 \leq 40. \end{aligned} \tag{46}$$

Величина a удовлетворяет данному условию.

Длина горизонтальных полос в расчетной модели:

$$\begin{aligned} L &= 2 \cdot \sqrt{S} \cdot (m + 1), \\ L &= 2 \cdot \sqrt{5300} \cdot (7 + 1) = 1165 \text{ м.} \end{aligned} \tag{47}$$

Определяется количество вертикальных электродов.

Расстояние между вертикальными электродами:

$$\begin{aligned} a &= (0,25 \div 8) \cdot l_B, \\ a &= 4 \cdot 5 = 20 \text{ м,} \end{aligned} \tag{48}$$

где l_B - длина вертикального электрода, м.

Количество вертикальных электродов:

$$\begin{aligned} n_B &= \frac{4 \cdot \sqrt{S}}{a}, \\ n_B &= \frac{4 \cdot \sqrt{5300}}{20} = 14.56. \end{aligned} \tag{49}$$

Принимается: $n_B = 14$.

Стационарное сопротивление заземлителя [16]:

$$R = \rho \cdot \left(\frac{A}{\sqrt{S}} + \frac{1}{L + n_B + l_B} \right), \quad (50)$$

где ρ - эквивалентное удельное сопротивление грунта.

Глубина заложения заземлителей от поверхности земли:

$$h_3 = 0 \div 0,1 \cdot \sqrt{S}, \quad (51)$$

$$h_3 = 0 \div 10 \text{ м.}$$

Принимается: $h_3 = 0,7$.

Расчётное удельное эквивалентное сопротивление грунта:

$$\rho = \rho_2 \cdot \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^k, \quad (52)$$

где ρ_1 - удельное электрическое сопротивление верхнего слоя грунта, Ом/м;

ρ_2 - удельное электрическое сопротивление нижнего слоя грунта, Ом/м;

k - коэффициент.

Коэффициент рассчитывается:

$$k = 0,32 \cdot \left(1 + 0,26 \cdot \ln \frac{h_1}{l_B} \right) \text{ при } 1 \leq \frac{\rho_1}{\rho_2} \leq 10, \quad (53)$$

$$k = 0,43 \cdot \left(h_3 + 0,272 \cdot \ln \frac{a \cdot \sqrt{2}}{l_B} \right) \text{ при } 0,1 \leq \frac{\rho_1}{\rho_2} \leq 1, \quad (53)$$

Исходя из того, что $\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{50}{30} = 1,67$ расчет коэффициента k производится по формуле:

$$k = 0,32 \cdot \left(1 + 0,26 \cdot \ln \frac{0,5}{5}\right) = 0,1.$$

Эквивалентное сопротивление равно:

$$\rho = 30 \cdot \left(\frac{50}{30}\right)^{0,1} = 31,57 \frac{\text{Ом}}{\text{м}}.$$

Расчётное сопротивление искусственного заземлителя:

$$R = 31,57 \cdot \left(\frac{0,4}{\sqrt{5300}} + \frac{1}{1165 + 8 \cdot 5}\right) = 0,2 \text{ Ом}.$$

Импульсный коэффициент:

$$\alpha_{\text{и}} = \sqrt{\frac{1500 \cdot \sqrt{5}}{(\rho + 320) \cdot (I_{\text{М}} + 45)}}, \quad (54)$$

$$\alpha_{\text{и}} = \sqrt{\frac{1500 \cdot \sqrt{5300}}{(31,57 + 320) \cdot (60 + 45)}} = 1,72.$$

Импульсное сопротивление заземлителя:

$$R_{\text{и}} = R \cdot \alpha_{\text{и}}, \quad (55)$$

$$R_{\text{и}} = 0,2 \cdot 1,72 = 0,35 \text{ Ом}$$

Условие $R_{\text{и}} < 0,5$ выполняется» [16].

6.2 Расчет молниезащиты

Молниезащита подстанции 110/6/6 кВ предназначена для защиты оборудования и зданий от прямых ударов молнии и сопутствующих перенапряжений. Эффективная молниезащита минимизирует риск повреждений и обеспечивают безопасность персонала, оборудования и окружающей инфраструктуры.

На подстанции молниезащите подлежат:

- открытые распределительные устройства (ОРУ): линии электропередач, силовые трансформаторы, шинопроводы;
- здания и сооружения: оперативный блок управления, распределительные устройства 6 кВ;
- вспомогательное оборудование: системы охлаждения, трансформаторы собственных нужд, кабельные конструкции;
- система заземления: для предотвращения электрических пробоев и вторичных повреждений.

Молниеотводы защищают оборудование, перенаправляя разряд молнии в систему заземления, предотвращая попадание разряда на объекты подстанции. Это достигается:

- созданием зоны защиты (обеспечивает укрытие всех защищаемых объектов под потенциалом молниеотвода);
- безопасным отводом тока разряда (ток молнии уходит в землю через заземляющее устройство молниеотвода).

«Зона защиты молниеотвода - это объём пространства, внутри которого защищённые объекты с высокой вероятностью не подвергаются прямым ударам молнии. Зоны защиты определяются:

- типом молниеотвода (одиночный стержневой, тросовый, комбинированный);
- высотой молниеотвода и его расстоянием от защищаемых объектов.

Для одиночного молниеотвода зона защиты представляет собой коническую поверхность. Для двух или более молниеотводов учитывается перекрытие зон защиты.

Нормируется два вида зон:

Зона А- с надежностью не менее 0,995 и $U \leq 500$ кВ.

Зона Б- с надежностью не менее 0,95 и $U > 500$ кВ.

Для защиты от прямого удара молнии применяются стержневые молниеотводы, тросовые молниеотводы, а также молниезащитные сетки и металлические кровли.

Зона защиты двух равновеликих стержневых молниеотвода.

На ОРУ 110 кВ произведен расчет для зоны защиты типа- А- с надежностью не менее 0,995 и $U \leq 500$ кВ.

Высота молниеотвода: $H = 25$ м, при $H \leq 150$ м.

Высота зоны защиты:

$$h_{\text{эф}} = 0,85 \cdot H, \quad (56)$$

$$h_{\text{эф}} = 0,85 \cdot 25 = 21,25 \text{ м.}$$

Радиус круга зоны защиты на уровне земли:

$$r_0 = (1,1 - 0,002 \cdot H) \cdot H, \quad (57)$$

$$r_0 = (1,1 - 0,002 \cdot 25) \cdot 25 = 26,25 \text{ м.}$$

Высота защищаемого объекта:

- $h_x = 11$ м -на уровне шинного портала;
- $h_x = 16,5$ м -на уровне линейного портала» [16].

Расстояние между молниеотводами приведено в таблице 13.

Таблица 13 – Результаты расчета молниезащиты

Молниеотводы	L , м	r_{cx} на уровне 1-го защищаемого объекта, м	r_{cx} на уровне 2-го защищаемого объекта, м	r_{cx} на уровне земли, м
1-2	44	12,662	17,2	26,25
2-3	80	12,662	0,884	26,25
3-4	46,8	12,662	15,61	26,25
1-4	80	12,662	0,884	26,285

Половина ширины внутренней зоны на уровне земли при $H < L \leq 2 \cdot H$:

$$r_{c0} = r_0 = 26,25 \text{ м.} \quad (58)$$

Половина ширины зоны на уровне земли при $2H < L \leq 4 \cdot H$:

$$r_{c0} = r_0 \cdot \left(1 - \frac{0,2 \cdot (L - 2 \cdot H)}{H}\right). \quad (59)$$

Минимальная высота зоны защиты:

$$h_{cx} = h_{эф} \cdot (0,17 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot H) \cdot (L - H). \quad (60)$$

Половина ширины внутренней зоны на высоте защищаемого объекта:

$$r_{cx} = r_{c0} \cdot \left(\frac{h_{cx} - h_i}{h_{cx}}\right). \quad (61)$$

Радиус круга зоны защиты защищаемого объекта:

$$r_x = r_0 \cdot \left(1 - \frac{h_x}{h_{\text{эф}}}\right). \quad (62)$$

Расчёт молниезащиты подстанции сводится к выбору молниеотводов необходимого типа и высоты, обеспечивающих покрытие всех защищаемых объектов зоной защиты. Для подстанции 110/6/6 кВ рекомендовано использовать стержневые молниеотводы высотой 20 м, установленные по углам и в центре ОРУ, что обеспечивает полное перекрытие зоны защиты. Молниеотводы подключаются к общему заземляющему устройству, обеспечивая безопасный отвод тока разряда в землю.

Выводы по разделу 6

Система заземления и молниезащиты подстанции 110/6/6 кВ разработана с целью обеспечения безопасности персонала и надёжности работы оборудования. Система заземления создана с использованием вертикальных электродов, объединённых в общую заземляющую сеть, что позволяет эффективно рассеивать токи утечки и минимизировать опасные потенциалы на поверхности земли. Молниезащита включает использование стержневых молниеотводов, формирующих зоны защиты, которые полностью покрывают все элементы подстанции, включая трансформаторы, распределительные устройства и здания. Выбранные решения соответствуют нормативным требованиям, обеспечивают защиту от коротких замыканий, перенапряжений и прямых ударов молнии, гарантируя надёжную и безопасную эксплуатацию подстанции.

Заключение

В результате выполнения выпускной квалификационной работы был разработан проект подстанции 110/6/6 кВ для обеспечения надёжного и безопасного электроснабжения химического предприятия. Выполненные расчёты и технические решения подтверждают соответствие проектных параметров современным нормативным требованиям и стандартам.

Основной целью работы являлось проектирование подстанции, обеспечивающей устойчивую работу энергоёмких технологических процессов предприятия, включая производство полимеров, синтетической резины и других химических материалов. Для достижения этой цели были последовательно выполнены следующие задачи:

- проведён анализ электрических нагрузок предприятия, определены категории надёжности потребителей, рассчитаны токи короткого замыкания и рабочие токи;
- подобрано силовое оборудование: трансформаторы 110/6/6 кВ, комплектные распределительные устройства, трансформаторы тока и напряжения, а также ограничители перенапряжений;
- разработаны системы релейной защиты и автоматики на основе современных микропроцессорных устройств «Сириус-Т», включающих функции максимальной токовой защиты, защиты от перегрузки и газовой защиты трансформаторов;
- выполнен расчёт заземляющего устройства подстанции, обеспечивающего безопасное рассеивание токов утечки и минимизацию опасных потенциалов на поверхности земли;
- разработана система молниезащиты подстанции, обеспечивающая защиту оборудования от прямых ударов молнии и переходных перенапряжений.

Предложенные решения базируются на использовании современного оборудования и технологий, что обеспечивает высокую надёжность работы

подстанции, минимизирует риски аварий и позволяет адаптировать систему к возможным изменениям в нагрузке.

Проектирование велось с учётом специфики технологических процессов химического предприятия, включая потребителей первой и второй категорий надёжности. Разработанные технические решения предусматривают высокий уровень автоматизации подстанции, что позволяет минимизировать человеческий фактор и повысить эксплуатационную безопасность. Особое внимание уделено энергоэффективности системы, обеспечивающей стабильную работу оборудования с минимальными потерями.

Практическая значимость выполненной работы заключается в применении её результатов для проектирования реальных объектов энергоснабжения, аналогичных разработанной подстанции, что способствует повышению общей энергоэффективности и безопасности электроэнергетической инфраструктуры.

Таким образом, поставленные в работе цели достигнуты, а выполненные задачи обеспечили её комплексное выполнение. Проектная документация подстанции 110/6/6 кВ может быть рекомендована для реализации и использования в реальных условиях химического производства.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Андреев В. А. Релейная защита систем электроснабжения в примерах и задачах: Учебное пособие. Москва: Высшая школа, 2019. 256 с.
2. АО «ГК «Электрощит» – ТМ Самара» [сайт]. URL: electroshield.nt-rt.ru (дата обращения 11.12.2024).
3. Вахнина В. В., Черненко А. Н. Проектирование систем электроснабжения. /Электронное учебно- методическое пособие. Тольятти, 2016. 78 с.
4. 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: 27.04.2024).
5. Гуревич Ю.Е. Особенности электроснабжения промышленного потребителя. Москва: Торус Пресс, 2019. 408 с.
6. Дубинский Г.Н., Левин Л.Г. Наладка устройств электроснабжения напряжением свыше 1000 В: Учебное пособие. М.: Солон-Пресс, 2019. 416 с.
7. Кадомская К.П., Лавров Ю.А. Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Вологда: Инфра-Инженерия, 2017. 343 с.
8. Кудрин Б.И., Жилин Б.В., Матюнина Ю.В. Электроснабжение потребителей и режимы: Учебное пособие. Москва: МЭИ, 2018. 412 с.
9. Кудрин Б. И. Электроснабжение: учебное пособие. Москва: Academia, 2019. 352 с.
10. Мазуркевич В. Н. Электрическая часть электрических станций и подстанций. Часть 2: учебно-методическое пособие для практических занятий в 2 ч. Минск: БНТУ, 2017. 62 с.
11. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учеб. пособие для ВУЗов. 5-е издание, перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2018. 608 с.

12. РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания - М.: Энергия, 2018. 69 с.

13. Рожкова Л.Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций: Учебник для студентов учреждений среднего профессионального образования. М.: ИЦ Академия, 2018. 448 с.

14. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. 4-е изд., перераб. и доп. М.: ЭНАС, 2018. 312 с.

15. СТО 56947007-29.240.10.248-2017. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35 - 750 кВ (НТП ПС) [Текст] : официальное издание. – М. : Энергоатомиздат, 2021. – 135 с.

16. СТО 56947007-29.130.15.114-2012. ФСК ЕЭС руководящие указания по проектированию заземляющих устройств подстанций напряжением 6-750 кВ [Текст]: утв. Сов-ом директоров ОАО «Россети» 23.10.2013: ввод в действие с 27.12.2013. – М: ФСК ЕЭС, 2013. – 196 с. (дата обращения: 26.05.2023).

17. Фролов Ю. М., Шелякин В. П. Основы электроснабжения: Учебное пособие. Москва: Лань, 2018. 480 с.

18. Хорольский В.Я., Таранов М.А. Надежность электроснабжения: Учебное пособие. Москва: Форум, Инфра-М, 2019. 128 с.

19. Шеховцов В.П. Расчет и проектирование схем электроснабжения: учебное пособие. М.: Форум, Инфра-М, 2020. 216 с.

20. Шестаков Д.Н., Помялов С.Ю. Релейная защита трансформаторов с использованием микропроцессорного устройства «Сириус-Т»: Методические указания для дипломного проектирования защит трансформаторов раздела «Релейная защита». Курган: КГУ, 2011. 55 с.