

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 ПС «Самашки»

Обучающийся

Д. О. Марков

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доц. Ю. В. Черненко

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

Тольятти 2025

Аннотация

Работа посвящена проектированию электрической части понизительной подстанции энергосистемы 110/10/10 кВ «Самашки», на которой установлены силовые трансформаторы с расщеплённой обмоткой марки ТРДН-25000/110.

В рамках выполнения работы, решены следующие основные задачи:

- подробное описание объекта проектирования;
- оптимальный выбор схемы подстанции;
- расчёт электрических нагрузок и токов короткого замыкания;
- обоснованный выбор силовых трансформаторов, электрических аппаратов, проводников;
- проектирование системы собственных нужд и системы заземления;
- разработка современной эффективной системы релейной защиты и автоматики.

Показано, что рациональные мероприятия по проектированию подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» способны значительно повысить показатели надёжности, безопасности и экономичности всей энергосистемы региона, а также существенно уменьшить расходы на обслуживание электрооборудования, перетоки реактивных мощностей и потери активной электроэнергии в электрической сети региона.

Содержание

Введение.....	4
1 Описание объекта проектирования	6
2 Выбор схемных решений, расчёт электрических нагрузок и выбор силовых трансформаторов.....	12
2.1 Выбор схемных решений	12
2.2 Расчет электрических нагрузок	18
2.3 Выбор и проверка силовых трансформаторов подстанции.....	22
3 Расчёт токов короткого замыкания на подстанции	28
4 Выбор электрических аппаратов и проводников электрической схемы подстанции	36
4.1 Выбор электрических аппаратов и проводников на стороне 110 кВ подстанции.....	36
4.2 Выбор электрических аппаратов и проводников на стороне 10 кВ подстанции.....	42
5 Собственные нужды и система заземления подстанции	48
5.1 Расчёт системы собственных нужд подстанции	48
5.2 Расчёт системы заземления подстанции.....	53
6 Релейная защита и автоматика элементов подстанции.....	60
Заключение	65
Список используемых источников.....	70

Введение

Вопросы проектирования электрической части понизительных трансформаторных подстанций энергосистемы занимают особое место в развитии современной электроэнергетики Российской Федерации.

На сегодняшний день значительная часть существующего оборудования распределительных и питающих сетей находится в эксплуатации свыше нормативного срока и характеризуется повышенной степенью физического и морального износа, что снижает их надёжность, экономичность и эффективность работы.

В связи с этим, особое значение приобретает проектирование новых объектов и реконструкция существующих понизительных подстанций с применением современных технических решений, новых материалов и оборудования, которые соответствуют актуальным требованиям нормативных документов, стандартов и рекомендаций в области энергетики.

Высокие темпы развития региональных энергосистем, рост нагрузки со стороны промышленных, коммунальных и бытовых потребителей предъявляют повышенные требования к качеству, надёжности и устойчивости функционирования понизительных подстанций. Особое внимание уделяется надёжности электроснабжения потребителей второй категории, которым необходимо обеспечивать электроэнергию в объёме, достаточном для нормального производственного процесса с минимальными перерывами. В связи с этим важнейшим этапом при проектировании электрических схем подстанций является оптимальный выбор схемы и силового оборудования, обеспечивающих высокие показатели надёжности, экономичности и эксплуатационной безопасности в условиях современной эксплуатации.

Основной целью данной работы является повышение надёжности и пропускной способности региональной энергосистемы путём ввода в эксплуатацию «электрической части понизительной подстанции 110/10/10 кВ «Самашки», обеспечивающей качественное и надёжное электроснабжение

потребителей» [16] второй категории надёжности с помощью рациональных схемных решений, а также силовых трансформаторов с расщеплённой обмоткой марки ТРДН-25000/110. «Объектом исследования является электрическая часть подстанции 110/10/10 кВ «Самашки», обеспечивающая электроснабжение потребителей» [16] на номинальном напряжении 10 кВ.

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки качественных проектов и ввода в эксплуатацию рациональных технических решений, направленных на обеспечение пропускной способности и увеличение нагрузочной способности энергосистемы. Практическая ценность работы заключается в том, что результаты, полученные в ходе проектирования новой подстанции 110/10/10 кВ «Самашки», позволят повысить надёжность и безопасность электроснабжения промышленных, бытовых и коммунальных потребителей, существенно снизить эксплуатационные расходы и потери электроэнергии, а также создать условия для дальнейшего развития инфраструктуры энергосистемы региона, учитывая перспективы роста электропотребления [19].

В рамках выполнения работы, поставлены следующие основные задачи, которые требуют решения в процессе выполнения исследований:

- подробное описание объекта проектирования;
- оптимальный выбор схемы подстанции;
- расчёт электрических нагрузок и токов короткого замыкания;
- обоснованный выбор силовых трансформаторов, электрических аппаратов, проводников;
- проектирование системы собственных нужд и системы заземления;
- разработка современной эффективной системы релейной защиты и автоматики.

Методологической основой исследования является комплексный подход, включающий анализ нормативных и технических документов, расчётно-аналитические и экспериментально-расчётные методы.

Описание объекта проектирования

На первом этапе проводится описание объекта проектирования, включая анализ исходных данных по электрической части подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» [16].

Расположение подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» на карте местности показано на рисунке 1.

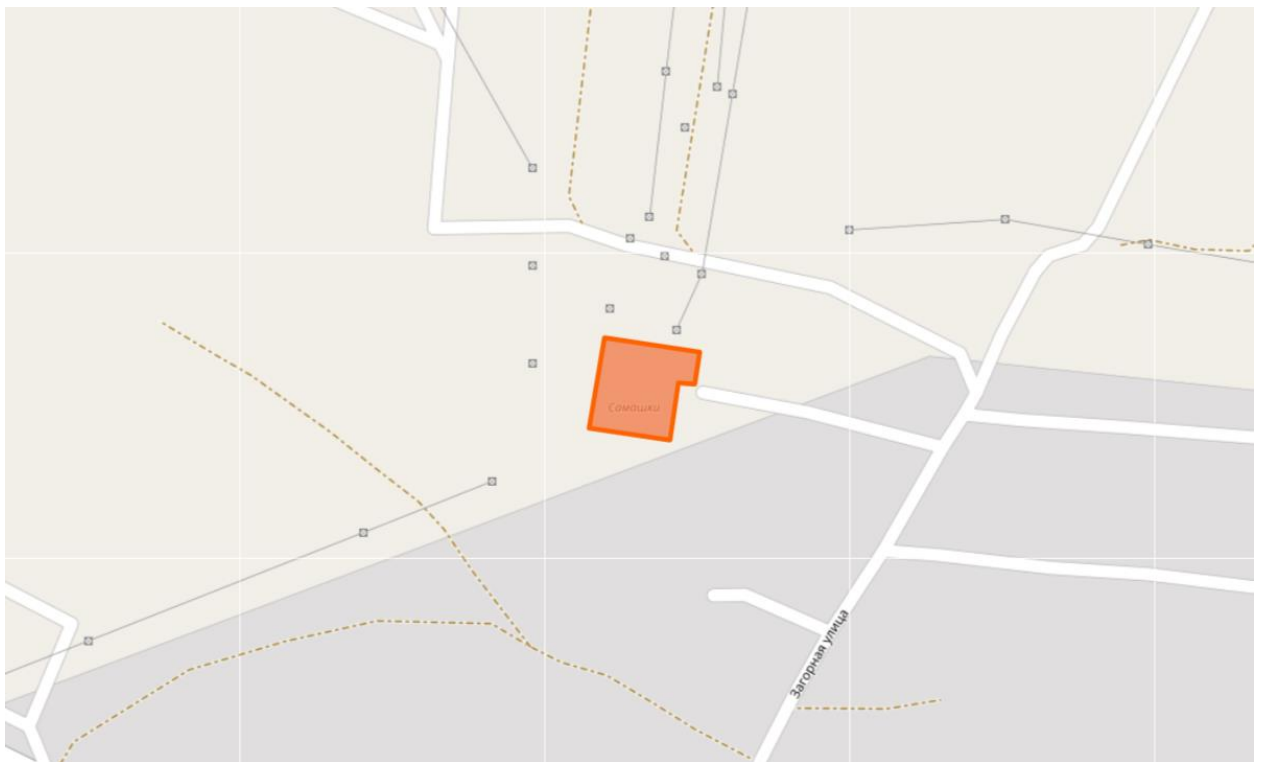


Рисунок 1 – Расположение подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» на карте местности

Согласно техническим данным энергосистемы, питание проектируемой подстанции осуществляется двумя линиями от энергосистемы на напряжении 110 кВ.

Питающая сеть 110 кВ, к которой будет подключена подстанция, образует единый комплекс высоковольтных линий, связывающих региональные и межрегиональные центры нагрузок.

Данное решения необходимо проверить и технически обосновать в работе, выбрав наиболее рациональные решения.

Схема питания ПС-110/10/10 кВ «Самашки» двумя воздушными линиями напряжением 110 кВ энергосистемы показана на рисунке 2.

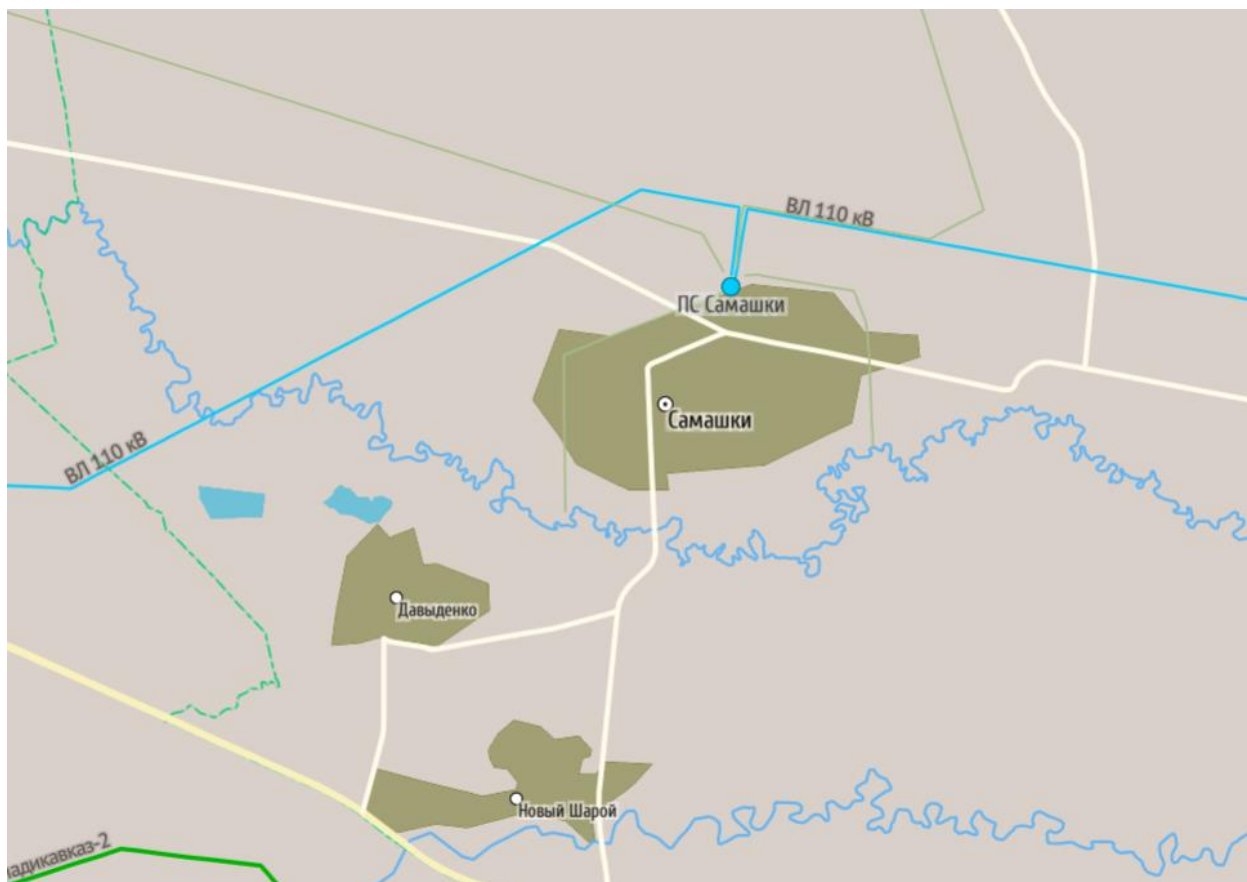


Рисунок 2 – Схема питания ПС-110/10/10 кВ «Самашки» двумя воздушными линиями напряжением 110 кВ энергосистемы

Согласно исходным данным на проектирование, рассматриваемая подстанция питает промышленные, бытовые и коммунальные потребители региона.

Исходные данные к выполнению работы, следующие:

- на подстанции применяются силовые трансформаторы с расщеплённой обмоткой низшего напряжения марки ТРДН-25000/110;
- электрическая схема подстанции – конечная (тупиковая);
- от подстанции получают питание электроприемники 2 категории надёжности.

Проводится анализ исходных данных на выполнение работы.

Исходными данными для проектирования электрической части подстанции «Самашки» служит комплекс технических условий, которые определяют все ключевые решения и параметры разрабатываемого объекта.

Особое внимание в задании уделяется применению на подстанции силовых трансформаторов с расщеплённой обмоткой низшего напряжения марки ТРДН-25000/110, показанные на рисунке 3.



Рисунок 3 – Силовой трансформатор с расщеплённой обмоткой низшего напряжения марки ТРДН-25000/110

Данные трансформаторы имеют номинальную мощность 25 МВА, первичное напряжение 110 кВ и вторичное напряжение 10 кВ с двумя расщеплёнными обмотками.

Особенность конструкции таких трансформаторов позволяет осуществить гибкое распределение нагрузки между двумя секциями низшего напряжения, существенно повысить надёжность и обеспечить оптимальные условия эксплуатации, особенно при выполнении ремонтных или аварийных работ на одной из секций.

По месту расположения в энергосистеме, подстанция «Самашки», согласно исходным условиям, выполняется концевой (тупиковой), что предполагает отсутствие транзита мощности.

Такой тип подстанции применяется преимущественно в тех случаях, когда она является конечным объектом в системе электроснабжения, получающим питание от одной или нескольких линий высшего напряжения без её передачи (транзита) на другие подстанции.

Концевой тип подстанции определяет специфику конфигурации оборудования и коммутационной аппаратуры, так как вся мощность, поступающая на подстанцию, предназначена исключительно для собственных электроприёмников, и при этом необходимо обеспечить высокую надёжность и безопасность питания с учётом возможных отключений питающих линий.

Важнейшим фактором, определяющим требования к проектируемой подстанции, является категория надёжности электроснабжения потребителей. Согласно техническим условиям, электроприёмники, подключенные к подстанции «Самашки», относятся ко второй категории надёжности электроснабжения.

Известно, что данная категория предполагает возможность кратковременных перерывов в электроснабжении, необходимых для переключения на резервные источники питания, при условии своевременного восстановления подачи электроэнергии.

В этой связи, в ходе разработки мероприятий по проектированию, необходимо предусмотреть обязательное резервирование основных элементов электрической схемы, «использование надёжных схем распределительных

устройств, установку современной коммутационной аппаратуры и эффективных систем автоматизации и защиты.

Таким образом, на основании заданных исходных» [13] данных по проектированию подстанции «Самашки», требуется разработать её технически обоснованную схему главных электрических соединений, учитывающую специфику потребителей конечной конфигурации подстанции, информация о которых приведена в таблице 1.

Согласно исходным техническим данным, подстанция 110/10/10 кВ «Самашки» обслуживает на напряжении 10 кВ восемь отходящих линий к потребителям 10 кВ с проектной нагрузкой по 5000 кВт каждая.

Таблица 1 – Исходные данные потребителей ПС-110/10/10 кВ «Самашки»

Номер линии потребителей	Состав потребителей	P_m , кВт
Л1	Промышленная, бытовая и коммунальная нагрузка	5000,0
Л2	Промышленная, бытовая и коммунальная нагрузка	5000,0
Л3	Промышленная, бытовая и коммунальная нагрузка	5000,0
Л4	Промышленная, бытовая и коммунальная нагрузка	5000,0
Л5	Промышленная, бытовая и коммунальная нагрузка	5000,0
Л6	Промышленная, бытовая и коммунальная нагрузка	5000,0
Л7	Промышленная, бытовая и коммунальная нагрузка	5000,0
Л8	Промышленная, бытовая и коммунальная нагрузка	5000,0
Всего нагрузки 10 кВ подстанции		40000,0

Приведённая в работе исходная техническая информация по объекту исследования используется далее.

Выводы по разделу.

Согласно техническим данным энергосистемы, питание проектируемой подстанции осуществляется двумя линиями от энергосистемы на напряжении 110 кВ.

Питающая сеть 110 кВ, к которой будет подключена подстанция, образует единый комплекс высоковольтных линий, связывающих региональные и межрегиональные центры нагрузок.

Исходные данные к выполнению работы, следующие:

- на подстанции применяются силовые трансформаторы с расщеплённой обмоткой низшего напряжения марки ТРДН-25000/110;
- электрическая схема подстанции – концевая (тупиковая);
- от подстанции получают питание электроприемники 2 категории надёжности.

Согласно исходным данным на проектирование, рассматриваемая подстанция питает промышленные, бытовые и коммунальные потребители региона.

Установлено, что суммарная нагрузка проектируемой подстанции равна 40000 кВА.

Выбор схемных решений, расчёт электрических нагрузок и выбор силовых трансформаторов

Выбор схемных решений

Основываясь на исходных данных на выполнение работы, которые предусматривают установку на подстанции силовых трансформаторов с расщеплённой обмоткой низшего напряжения марки ТРДН-25000/110, а также учитывая то, что подстанция по месту расположения в энергосистеме – концевая (тупиковая) и от неё получают питание электроприемники 2 категории надёжности, в работе приняты следующие основные схемные решения:

- число силовых трансформаторов указанной марки принимается равным двум единицам;
- питание «подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» осуществляется от двух независимых источников воздушными линиями напряжением 110 кВ;
- в схеме подстанции расположены два распределительных устройства (РУ) напряжением 110 кВ и 10 кВ;
- РУ-110 кВ подстанции служит для приёма электроэнергии от энергосистемы на 110 кВ и распределения её на силовые трансформаторы. Оно выполняется открытым (ОРУ-110 кВ) с применением схемы 110-4Н «Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линии»;
- РУ-10 кВ предназначено для приема электроэнергии пониженного напряжения от силовых трансформаторов подстанции, с последующим распределением электроэнергии среди потребителей на уровне напряжения 10 кВ. В этом устройстве, выполненном в виде закрытого распределительного устройства (ЗРУ), использует комплектные ячейки» [13] внутренней установки типа КРУ и

применятся схема «Две секционированные системы сборных шин» с распределением по 4 линии потребителей на каждую систему сборных шин.

Проводится характеристика основных схемных решений, принятых на подстанции.

Всё оборудование ОРУ-110 кВ подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» будет размещено на унифицированных железобетонных опорах с металлическими конструкциями для установки и крепления электрического оборудования. Всё оборудование – открытого исполнения.

Такое открытое размещение оборудования напряжением 110 кВ подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» является рациональным и технически обоснованным решением, обеспечивающим высокую степень надёжности, безопасности и долговечности работы оборудования.

Выбранная электрическая «схема 110-4Н «Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линии»» [3] для применения в распределительном устройстве 110 кВ проектируемой подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» является оптимальным решением с точки зрения обеспечения высокого уровня надежности электроснабжения потребителей второй категории.

Данная схема предусматривает два самостоятельных блока, каждый из которых включает отдельный выключатель высокого напряжения и разъединитель, подключённые к своему трансформатору.

Между этими блоками выполнена неавтоматическая перемычка, подключаемая через разъединители со стороны линии. Данная схема характеризуется повышенной гибкостью эксплуатации, обеспечивая возможность проведения планового ремонта или технического обслуживания отдельного блока без существенного перерыва в электроснабжении потребителей, за счёт переключения нагрузки на второй трансформатор.

Использование схемы 110-4Н на концевой подстанции «Самашки» обеспечивает необходимые условия резервирования питания, позволяя

существенно сократить время отключения потребителей при выводе одного из трансформаторов в ремонт или при аварийной ситуации.

При этом неавтоматическая перемычка со стороны линии дополнительно расширяет возможности оперативных переключений, позволяя перераспределять нагрузку между силовыми трансформаторами подстанции в плановых и аварийных ситуациях.

«Схема 110-4Н «Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линии» для применения в РУ-110 кВ ПС 110/10/10 кВ «Самашки»» [3] показана на рисунке 4.

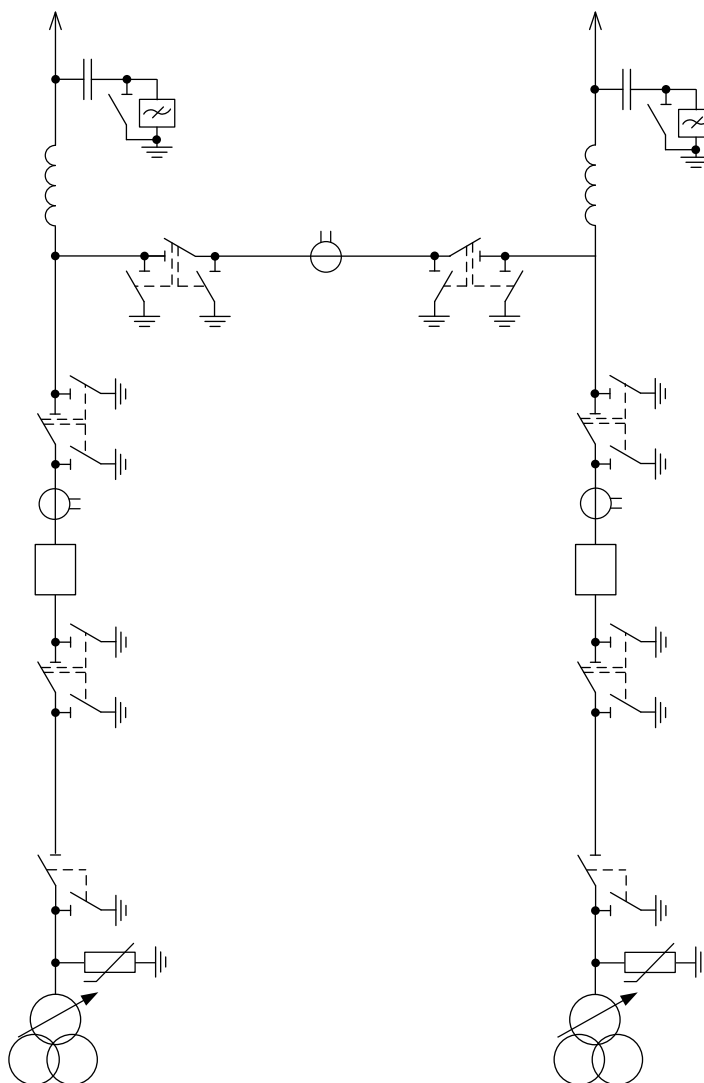


Рисунок 4 – Схема 110-4Н «Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линии» для применения в РУ-110 кВ ПС 110/10/10 кВ «Самашки»

В схеме РУ-110 кВ применяются защитные и коммутационные аппараты, такие как выключатели, разъединители, ограничители перенапряжений, а также измерительные трансформаторы тока и напряжения.

Таким образом, предложенные решения по размещению оборудования на унифицированных железобетонных опорах с металлическими конструкциями и применению схемы 110-4Н для ОРУ-110 кВ подстанции «Самашки» обоснованы необходимостью достижения высокого уровня надёжности, удобства эксплуатации, гибкости в управлении электроэнергетическим оборудованием, а также обеспечением долговечной и безопасной работы объекта в течение всего периода его эксплуатации.

Здание ЗРУ-10 кВ объединено с помещением общеподстанционного пункта управления (ОПУ), помещениями для ремонтно-эксплуатационного персонала и аппаратуры связи. В РУ-10 кВ подстанции 110/10/10 кВ была выбрана для применения схема «Две одиночные секционированные системы сборных шин», представленная на рисунке 5.

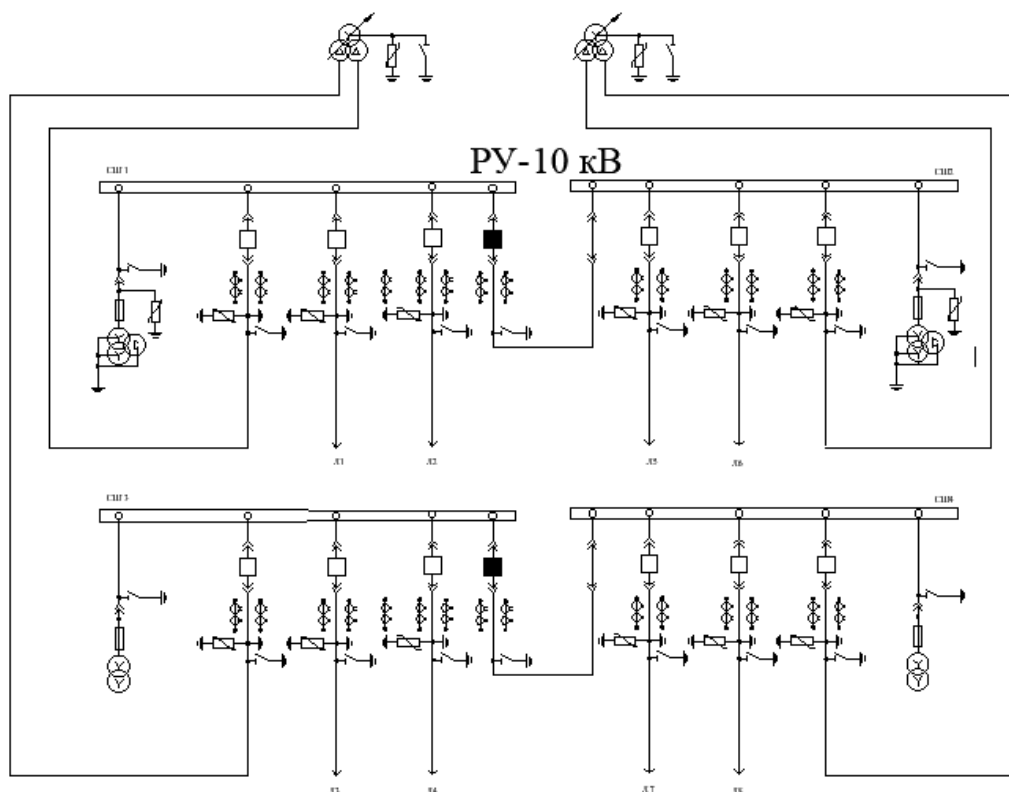


Рисунок 5 – Схема «Две одиночные секционированные системы сборных шин» для применения в РУ-10 кВ ПС 110/10/10 кВ «Самашки»

Данная схема является оптимальным решением, обеспечивающим надёжное электроснабжение потребителей при использовании трансформаторов с расщеплёнными обмотками низшего напряжения.

Такое схемное решение также ведёт к снижению аварийных рисков, поскольку короткое замыкание на одном присоединении не вызывает полного отключения всего участка сети, позволяя сохранять питание отходящих линий, которые остаются присоединёнными к работающей системе сборных шин схемы. С учётом этого, проводится разделение нагрузки 10 кВ на четыре секции сборных шин, которые образуют две секционированные выключателями, системы сборных шин. Результат распределения потребителей ПС-110/10/10 кВ «Самашки» после внедрения схемы «Две секционированные системы сборных шин» представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Результат распределения потребителей ПС-110/10/10 кВ «Самашки» после внедрения схемы «Две секционированные системы сборных шин»

Класс напряжения	Номер линии	Состав потребителей	P_m , кВт
Трансформатор Т-1			
Нагрузка I секции сборных шин 10 кВ Т-1			
10 кВ	Л1	Промышленная, бытовая и коммунальная нагрузка	5000,0
10 кВ	Л2	Промышленная, бытовая и коммунальная нагрузка	5000,0
Всего нагрузки I секции сборных шин 10 кВ Т-1			10000,0
Нагрузка II секции сборных шин 10 кВ Т-1			
10 кВ	Л3	Промышленная, бытовая и коммунальная нагрузка	5000,0
10 кВ	Л4	Промышленная, бытовая и коммунальная нагрузка	5000,0
Всего нагрузки II секции сборных шин 10 кВ Т-1			10000,0
Всего нагрузки 10 кВ Т-1			20000,0
Трансформатор Т-2			
Нагрузка I секции сборных шин 10 кВ Т-2			
10 кВ	Л5	Промышленная, бытовая и коммунальная нагрузка	5000,0
10 кВ	Л6	Промышленная, бытовая и коммунальная нагрузка	5000,0
Всего нагрузки I секции сборных шин 10 кВ Т-2			10000,0
Нагрузка II секции сборных шин 10 кВ Т-2			
10 кВ	Л7	Промышленная, бытовая и коммунальная нагрузка	5000,0
10 кВ	Л8	Промышленная, бытовая и коммунальная нагрузка	5000,0
Всего нагрузки II секции шин сборных 10 кВ Т-2			10000,0
Всего нагрузки 10 кВ Т-2			20000,0
Всего нагрузки 10 кВ подстанции			40000,0

«В распределительном устройстве 10 кВ, аналогично оборудованию РУ-110 кВ, предусмотрено использование защитных и коммутационных аппаратов, включая выключатели, ограничители перенапряжений, а также трансформаторы тока и напряжения, обеспечивающие измерительные» [3] и релейные функции. Для обеспечения питания собственных нужд подстанции в РУ-10 кВ требуется установить два трансформатора собственных нужд, что позволяет поддерживать работоспособность автоматики, телеизмерений, сигнализации, а также освещение территории подстанции и зданий РУ-10 кВ и ОПУ подстанции.

Важной частью работы является установка на подстанции силовых трансформаторов марки ТРДН-25000/110. Такие трансформаторы оснащены расщеплёнными вторичными обмотками, благодаря чему обеспечивается возможность формирования двух независимых секций сборных шин на стороне 10 кВ, что существенно повышает эксплуатационную гибкость, надёжность схемы и позволяет организовать раздельное электроснабжение потребителей, обеспечивая их резервирование [3].

Применение таких схемных решений способствует минимизации последствий аварийных отключений и увеличению стабильности работы системы. Характеристики силовых трансформаторов подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Технические характеристики силовых трансформаторов подстанции 110/10/10 кВ «Самашки»

Диспетчерское наименование трансформатора	Марка трансформатора	Номинальная мощность обмоток, кВА			Номинальное напряжение обмоток, кВ		
		ВН	НН1	НН2	ВН	НН1	НН2
T1	ТРДН-25000/110	25000	25000	25000	115,00	11,0	11,0
T2	ТРДН-25000/110	25000	25000	25000	115,00	11,0	11,0

Установлено, что все схемные решения, принятые на подстанции, являются стабильной основой для построения гибкой и надёжной сети, обеспечивая достаточное резервирование и повышая уровень надёжности.

Расчет электрических нагрузок

При выполнении расчёта нагрузок подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» применён аналитический метод коэффициентов спроса и коэффициентов одновременности, позволяющий наиболее точно определить прогнозируемые величины нагрузок отдельных групп потребителей и объекта в целом.

Расчёт нагрузок в работе необходим для определения нагрузки отходящих линий и выбора на них сечения проводников и электрических аппаратов.

Данные методы расчёта выбраны в связи с их высоким уровнем достоверности, проверенным опытом применения в отечественной практике и соответствием требованиям действующих нормативно-технических документов. Кроме того, метод коэффициентов спроса, используемый для расчёта нагрузок отдельных линий потребителей подстанции, позволяет учитывать специфику режимов работы потребителей, что обеспечивает рациональный и экономически целесообразный выбор электрооборудования.

Результаты выполненных расчётов позволяют выбрать и «проверить» мощность силовых трансформаторов, проводников и коммутационных аппаратов, обеспечивая при этом соответствие проектируемой схемы действующим нормам и правилам документов, а также отраслевым стандартам электробезопасности.

Таким образом, расчёт электрических нагрузок на подстанции» [6] 110/10/10 кВ «Самашки» является обязательным этапом, результаты которого используются для «дальнейшего выбора и проверки электротехнического оборудования, определения режимов эксплуатации и надёжности энергосистемы в целом, а также служат основой для проведения дальнейших этапов, направленных» [6] на повышение энергоэффективности и надёжности системы электроснабжения всего региона.

«Максимальная расчётная активная нагрузка присоединений подстанции, кВт» [6]:

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

где « P_n – номинальная (паспортная) активная нагрузка, кВт;

K_c – значение коэффициента спроса» [7].

«Так как подстанция работает в непрерывном продолжительном режиме круглосуточно, принимается значение $K_c = 1$.

Максимальная расчётная полная нагрузка присоединений подстанции, кВА» [6]:

$$S_p = \frac{P_p}{\cos \varphi}, \quad (2)$$

где $\cos \varphi$ - «коэффициент активной мощности, о.е.» [7].

«Максимальная расчётная реактивная нагрузка присоединений подстанции, квар» [6]:

$$Q_p = \sqrt{S_p^2 - P_p^2}. \quad (3)$$

«С учётом разделения потребителей на 4 секции сборных шин, суммарная нагрузка на сборных шинах 10 кВ подстанции» [6]:

$$P_{p.i} = K_o \cdot \sum_{i=1}^n P_p, \quad (4)$$

$$Q_{p.i} = K_o \cdot \sum_{i=1}^n Q_p, \quad (5)$$

$$S_{p.i} = \sqrt{P_{p.i}^2 + Q_{p.i}^2}, \quad (6)$$

где $P_{p.i}$, $Q_{p.i}$, $S_{p.i}$ - «соответственно, значение расчётной активной,

реактивной и полной нагрузки на сборных шинах 10 кВ подстанции;

K_o – коэффициент одновременности максимума нагрузок на сборных шинах 10 кВ подстанции, о.е» [6].

В связи с разделением нагрузки 10 кВ на четыре секции сборных шин, которые образуют две секционированные выключателями, системы сборных шин, нагрузка на каждый трансформатор с расщеплённой обмоткой будет равен сумме секций сборных шин подстанции:

$$P_{p.Ti} = K_o \cdot \sum_{i=1}^n P_{p.i}, \quad (7)$$

$$Q_{p.Ti} = K_o \cdot \sum_{i=1}^n Q_{p.i}, \quad (8)$$

$$S_{p.Ti} = \sqrt{P_{p.Ti}^2 + Q_{p.Ti}^2}, \quad (9)$$

где $P_{p.Ti}$, $Q_{p.Ti}$, $S_{p.Ti}$ - «соответственно, значение расчётной активной, реактивной и полной нагрузки 10 кВ трансформатора;
 K_o – коэффициент одновременности максимума нагрузок на сборных шинах 10 кВ трансформатора, о.е» [6].

Суммарная нагрузка подстанции определяется алгебраической суммой нагрузок двух силовых трансформаторов [8]:

$$P_{p.ПС} = P_{p.T1} + P_{p.T2}, \quad (10)$$

$$Q_{p.ПС} = Q_{p.T1} + Q_{p.T2}, \quad (11)$$

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

где « $P_{p.T1}$, $Q_{p.T1}$ – соответственно, расчётная активная и реактивная нагрузка на сборных шинах первого трансформатора подстанции;
 $P_{p.T2}$, $Q_{p.T2}$ – соответственно, расчётная активная и реактивная нагрузка на сборных шинах второго трансформатора» [8].

«При этом значение расчётного тока нагрузки» [8]:

$$I_{p.} = \frac{S_{p.}}{\sqrt{3} \cdot U_{н.}}, \quad (13)$$

где « $U_{н.}$ – номинальное напряжение, кВ» [8].

На примере линии Л1 напряжением 10 кВ первой секции сборных шин 10 кВ подстанции:

$$P_p = 5000 \cdot 1 = 5000 \text{ кВт},$$

$$S_p = \frac{5000}{0,94} \approx 5319,1 \text{ кВА},$$

$$Q_p = \sqrt{5319,1^2 - 5000^2} = 1814,6 \text{ квар},$$

$$I_{p.} = \frac{5319,1}{\sqrt{3} \cdot 10} \approx 307,1 \text{ А}.$$

Всего нагрузки I секции СШ 10 кВ Т-1 ($K_o=0,9$):

$$P_{p.1} = 0,9 \cdot (5000 + 5000) = 9000 \text{ кВт},$$

$$Q_{p.1} = 0,9 \cdot (1814,6 + 1814,6) = 3266,3 \text{ квар},$$

$$S_{p.1} = \sqrt{9000^2 + 3266,3^2} = 9574,4 \text{ кВА},$$

$$I_{p.} = \frac{9574,4}{\sqrt{3} \cdot 10} \approx 553,4 \text{ А}.$$

Последующий расчет электрических нагрузок подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» производится аналогично, результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты расчёта электрических нагрузок на подстанции 110/10/10 кВ «Самашки»

Номер линии	Состав потребителей	P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА	I_p , А
Трансформатор Т-1					
Нагрузка I секции сборных шин 10 кВ Т-1					
Л1	Бытовая и коммунальная нагрузка	5000,0	1814,6	5319,1	307,1
Л2	Бытовая и коммунальная нагрузка	5000,0	1814,6	5319,1	307,1
Всего нагрузки I секции СШ 10 кВ Т-1 ($K_o=0,9$)		9000,0	3266,3	9574,4	553,4
Нагрузка II секции сборных шин 10 кВ Т-1					
Л3	Бытовая и коммунальная нагрузка	5000,0	1814,6	5319,1	307,1
Л4	Бытовая и коммунальная нагрузка	5000,0	1814,6	5319,1	307,1
Всего нагрузки II секции СШ 10 кВ Т-1 ($K_o=0,9$)		9000,0	3266,3	9574,4	553,4
Всего нагрузки 10 кВ Т-1 ($K_o=0,9$)		16200,0	5879,3	17233,9	996,2
Трансформатор Т-2					
Нагрузка I секции сборных шин 10 кВ Т-2					
Л5	Бытовая и коммунальная нагрузка	5000,0	1814,6	5319,1	307,1
Л6	Бытовая и коммунальная нагрузка	5000,0	1814,6	5319,1	307,1
Всего нагрузки I секции СШ 10 кВ Т-2 ($K_o=0,9$)		9000,0	3266,3	9574,4	553,4
Нагрузка II секции сборных шин 10 кВ Т-2					
Л7	Бытовая и коммунальная нагрузка	5000,0	1814,6	5319,1	307,1
Л8	Бытовая и коммунальная нагрузка	5000,0	1814,6	5319,1	307,1
Всего нагрузки II секции СШ 10 кВ Т-2 ($K_o=0,9$)		9000,0	3266,3	9574,4	553,4
Всего нагрузки 10 кВ Т-2 ($K_o=0,9$)		16200,0	5879,3	17233,9	996,2
Всего нагрузки 10 кВ подстанции		32400,0	11758,6	34467,7	1992,4

Таким образом, полученные расчёты электрических нагрузок на подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» используются для дальнейшего выбора и проверки электротехнического оборудования, определения режимов эксплуатации и надёжности энергосистемы в целом, а также служат основой для проведения дальнейших этапов проектирования, направленных на повышение энергоэффективности и надёжности не только проектируемой подстанции, но и всей энергосистемы региона.

Выбор и проверка силовых трансформаторов подстанции

Ранее в работе было показано, что на проектируемой ПС 110/10/10 кВ «Самашки» предварительно планируется установить два силовых трансформатора марки ТРДН с расщеплёнными обмотками мощностью 25

МВА каждый. Данные трансформаторы необходимо проверить на соответствие установленной нагрузке, а также на условия перегрузочной способности.

На первом этапе подтверждается применение двух силовых трансформаторов на подстанции, что оправдано не только повышенными требованиями к питанию потребителей 2 категории надёжности, но и с точки зрения гибкости эксплуатационных режимов.

При этом применяется раздельная работа двух трансформаторов, что способствует распределению нагрузок и снижает вероятность перегрева обмоток, а также уменьшает удельные потери.

Мониторинг загрузки и своевременная оценка технического состояния каждого трансформатора подстанции позволяют оптимизировать график ремонтов и продлевать ресурс оборудования.

При этом соответствующее разделение потоков мощности снижает пиковое тепловое воздействие на изоляцию и минимизирует риск повреждений во время режимов перегрузки.

Известно, что увеличение числа трансформаторов свыше двух обычно не имеет достаточного экономического эффекта, поскольку возрастает совокупная стоимость монтажа, обслуживания и ремонта дополнительного оборудования [13].

«Расчётная мощность силового трансформатора для установки на двухтрансформаторной подстанции» [16]:

$$S_{\text{ном.т.р.}} \geq \frac{S_{p.\text{ПС}}}{2 \cdot 0,7}, \quad (14)$$

где « $S_{p.\text{ПС}}$ – расчётная суммарная нагрузка подстанции» [16].

Проверка силовых трансформаторов марки ТРДН-25000/110, на соответствие нагрузке потребителей подстанции, по формуле (14) выполняется:

$$25000 \text{ кВА} \geq \frac{34467,7}{2 \cdot 0,7} \approx 24619,6 \text{ кВА}.$$

Таким образом, на подстанции были выбраны современные двухобмоточные силовые трансформаторы с расщеплённой обмоткой марки ТРДН-25000/110 мощностью 25 МВА каждый, оснащённые системой регулирования напряжения под нагрузкой (РПН), обладающие достаточным резервом по мощности и современными системами охлаждения, что позволяет эффективно эксплуатировать их в различных режимах работы.

«Проверка трансформаторов осуществляется по двум важным направлениям: соответствие фактической загрузки трансформаторов в нормальном эксплуатационном режиме и допустимость аварийных перегрузок оборудования в послеаварийном режиме работы» [2].

В нормальном режиме эксплуатации выбранные трансформаторы должны обеспечивать бесперебойное питание потребителей при максимально возможных расчётных нагрузках без превышения допустимых температурных пределов и с сохранением заданных параметров качества электроэнергии, что является обязательным требованием для функционирования объектов промышленной и коммунальной инфраструктуры.

Данная проверка проводится по следующему условию [2]:

$$K_{3.H} = \frac{S_{p.ПС}}{2 \cdot S_{T.НОМ}} \leq 0,7. \quad (15)$$

Условие проверки по формуле (15) выполняется:

$$K_{3.H} = \frac{34467,7}{2 \cdot 25000} = 0,68 \leq 0,7.$$

Кроме того, важным аспектом является проверка трансформаторов на возможность кратковременной работы в послеаварийных режимах, когда один из трансформаторов отключен из-за аварии или планового ремонта, а нагрузка распределяется на оставшийся в работе трансформатор.

В этом случае силовые трансформаторы марки ТРДН мощностью 25 МВА и напряжением 110/10/10 кВ должны выдерживать кратковременные перегрузки, не допуская перегрева обмоток выше допустимых значений, чтобы исключить повреждения оборудования и предотвратить длительные перерывы в энергоснабжении потребителей.

Учитывая современные конструктивные решения данных трансформаторов, в том числе наличие масляного охлаждения с дутьём и расщеплённые обмотки низшего напряжения, обеспечивается высокий запас устойчивости оборудования в аварийных ситуациях и повышенная способность трансформаторов выдерживать кратковременные токовые перегрузки.

Данная проверка проводится по следующему условию [2]:

$$K_{3.П} = \frac{S_{ПС}}{S_{Т.НОМ}} \leq 1,4. \quad (16)$$

Условие проверки по формуле (16) выполняется:

$$K_{3.Н} = \frac{34467,7}{1 \cdot 25000} = 1,38 \leq 1,4.$$

Проведённый в работе анализ показывает, что выбранные к установке на подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» трансформаторы марки ТРДН-25 МВА полностью удовлетворяют всем предъявляемым нормативным требованиям как по допустимой нагрузке в нормальном режиме эксплуатации, так и по

способности кратковременного выдерживания перегрузок в послеаварийных режимах.

Следовательно, принятые трансформаторы не только обеспечивают необходимый запас по мощности, но и способствуют повышению эксплуатационной надёжности подстанции и улучшению качества электроснабжения региона, отвечая современным техническим требованиям и стандартам, а также создавая значительные предпосылки для дальнейшего развития системы электроснабжения региона.

Выводы по разделу.

Основываясь на исходных данных на выполнение работы, которые предусматривают установку на подстанции силовых трансформаторов с расщеплённой обмоткой низшего напряжения марки ТРДН-25000/110, а также учитывая то, что подстанция по месту расположения в энергосистеме – концевая (тупиковая) и от неё получают питание электроприемники 2 категории надёжности, в работе приняты следующие основные схемные решения:

- число силовых трансформаторов указанной марки принимается равным двум единицам;
- питание подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» осуществляется от двух независимых источников воздушными линиями напряжением 110 кВ;
- в схеме подстанции расположены два распределительных устройства (РУ) напряжением 110 кВ и 10 кВ;
- РУ-110 кВ подстанции служит для приёма электроэнергии от энергосистемы на 110 кВ и распределения её на силовые трансформаторы. Оно выполняется открытым (ОРУ-110 кВ) с применением схемы 110-4Н «Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линии»;
- РУ-10 кВ предназначено для приема электроэнергии пониженного напряжения от силовых трансформаторов подстанции, с последующим распределения электроэнергии среди потребителей на

уровне напряжения 10 кВ. В этом устройстве, выполненном в виде закрытого распределительного устройства (ЗРУ), использует комплектные ячейки внутренней установки типа КРУ и применяется схема «Две секционированные системы сборных шин» с распределением по 4 линии потребителей на каждую систему сборных шин.

Получены расчёты электрических нагрузок на подстанции 110/10/10 кВ «Самашки»:

- отдельных присоединений потребителей;
- секций сборных шин 10 кВ;
- силовых трансформаторов;
- всей подстанции.

В результате проведения анализа установлено, что выбранные к установке на подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» работе силовые трансформаторы с расщеплённой обмоткой марки ТРДН-25 МВА полностью удовлетворяют всем предъявляемым нормативным требованиям как по допустимой нагрузке в обычных режимах эксплуатации, так и по способности кратковременного выдерживания перегрузок в послеаварийных режимах.

Таким образом, принятые в работе силовые трансформаторы не только обеспечивают необходимый запас по мощности, но и способствуют повышению эксплуатационной надёжности подстанции и улучшению качества электроснабжения региона, отвечая современным техническим требованиям и стандартам, а также создавая значительные предпосылки для дальнейшего развития энергетической системы региона.

Расчёт токов короткого замыкания на подстанции

«Известно, что расчёт токов короткого замыкания (КЗ) является одним из наиболее значимых и ответственных этапов при проектировании подстанций высокого напряжения, таких как рассматриваемая подстанция 110/10/10 кВ «Самашки». На данном объекте проектирования» [14] к установке приняты два современных силовых трансформатора с расщеплённой обмоткой марки ТРДН-25000/110, что оказывает существенное влияние на параметры токов КЗ и особенности расчёта аварийных режимов.

Корректный и точный расчёт этих токов позволяет обеспечить правильный выбор электрических аппаратов защиты и коммутации, определять необходимые настройки релейной защиты и автоматики, а также гарантировать безопасность эксплуатации оборудования и защиту персонала при возможных авариях и аварийных режимах.

Особенностью расчёта для подстанций, оборудованных трансформаторами с расщеплённой обмоткой, «является необходимость отдельного рассмотрения токов короткого замыкания на каждой из вторичных обмоток низшего напряжения. Данный подход обеспечивает высокую точность расчётов и позволяет корректно определить уровни электродинамических и термических воздействий на оборудование при возникновении трёхфазного короткого замыкания» [14].

В процессе выполнения расчёта определяется начальный симметричный ток трёхфазного короткого замыкания и ударный ток, возникающий в первые моменты развития аварийного процесса.

Полученные результаты расчёта используются для выбора электрических аппаратов с необходимой коммутационной способностью и электродинамической стойкостью, а также для определения параметров релейной защиты, способных обеспечить своевременное и эффективное отключение повреждённых участков сети.

Таким образом, расчёт токов короткого замыкания на проектируемой подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» с учётом использования современных трансформаторов ТРДН-25000/110 с расщеплённой обмоткой, «является важной и неотъемлемой частью проекта, обеспечивающей надёжность, безопасность и долговечность функционирования электроэнергетического оборудования и всей электросети» [14] в целом.

При проведении расчёта токов КЗ на подстанции, особое внимание уделяется послеаварийному режиму работы, когда из двух трансформаторов марки ТРДН-25000/110 в работе остаётся только один, поскольку в таком режиме фиксируются максимальные значения токов КЗ на сторонах 110 кВ и 10 кВ. Таким образом, в исходной расчётной схеме формируются следующие искомые точки КЗ:

- точка К1 – на выводах напряжением 110 кВ силового трансформатора подстанции;
- точки К2 и К3 – на выводах первой и второй расщеплённых обмоток напряжением 10 кВ силового трансформатора подстанции.

Исходная расчётная схема для расчётов токов КЗ на подстанции 110/10/10 кВ «Самашки», представлена на рисунке 6.

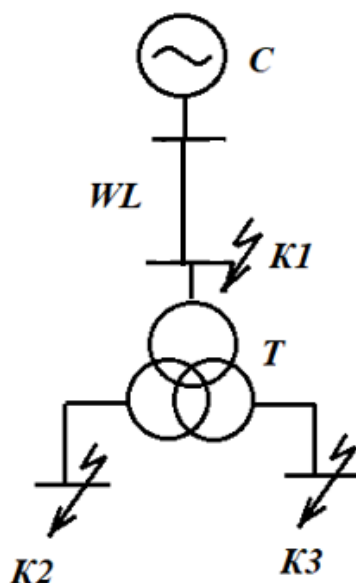


Рисунок 6 – Исходная расчётная схема для расчётов токов КЗ на подстанции 110/10/10 кВ «Самашки»

По исходной расчётной схеме, учитывая приведённую техническую информацию, построена схема замещения, представленная на рисунке 7.

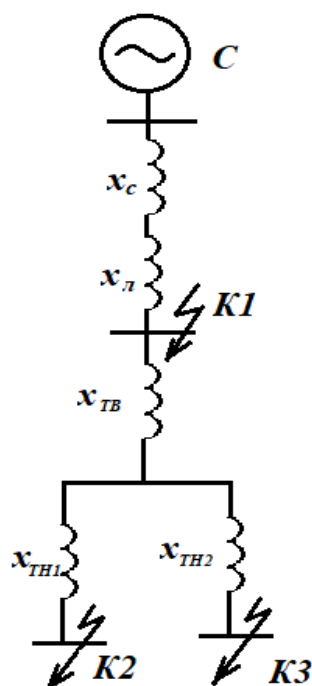


Рисунок 7 – Исходная схема замещения для расчётов токов КЗ на подстанции 110/10/10 кВ «Самашки»

«Расчёт токов КЗ на подстанции выполняется методом симметричных составляющих» [14], который является одним из наиболее точных и распространённых методов анализа режимов работы электрических сетей в аварийных ситуациях, таких как трёхфазные короткие замыкания.

Расчёт с использованием такого метода позволяет определить наиболее тяжёлые аварийные режимы работы, при которых величины токов короткого замыкания достигают максимальных значений на выводах трансформаторов со стороны напряжения 110 кВ, а также на секциях сборных шин 10 кВ.

При этом для обеспечения надёжности и безопасности работы устанавливаемого на подстанции оборудования учитываются два основных параметра: «начальное значение периодического тока трёхфазного короткого замыкания и ударный ток. Выполненные в работе расчёты позволят корректно выбрать коммутационные и защитные аппараты по критериям термической и

электродинамической стойкости, обеспечивая» [14] их надёжную работу в условиях аварийного режима.

Используя расчётную схемы и построенную по ней «схему замещения, проводится непосредственный расчёт токов КЗ на выводах силового трансформатора подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» в максимальном режиме. Базисная мощность принимается равной номинальной мощности силового трансформатора – 25000 кВА.

Базисные напряжения принимаются равными максимальным номинальным напряжениям на выводах силовых трансформаторов марки ТРДН-25000/110» [14]:

$$U_{\delta} = U_{\text{ном. макс. т}}, \quad (17)$$

где $U_{\text{ном. макс. т}}$ – номинальное напряжение на выводах силовых трансформаторов подстанции, кВ.

Таким образом:

$$U_{\delta 1} = 115 \text{ кВ},$$

$$U_{\delta 2} = 11 \text{ кВ}.$$

Базисный ток [14]:

$$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{\delta}}. \quad (18)$$

«Значения базисного тока с учётом принятых ранее базисных условий» [14] по формуле (18):

$$I_{\delta 1} = \frac{25}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,13 \text{ кА},$$

$$I_{\delta 2} = \frac{25}{\sqrt{3} \cdot 11} = 1,31 \text{ кА}.$$

«Далее проводится расчёт параметров схемы замещения в относительных единицах, с последующим приведением их к базисным условиям.

Сопротивление питающей энергосистемы» [14]:

$$x_{*\delta,c} = \frac{S_{\delta}}{S_{\kappa}''}, \text{ о.е.}, \quad (19)$$

где S_{κ}'' - «мощность энергосистемы в режиме КЗ на шинах источника питания» [14].

«При приведении к базисной мощности» [14] по формуле (19):

$$x_{*\delta,c} = \frac{25}{1000} = 0,025 \text{ о.е.}$$

«Сопротивление питающей линии 110 кВ» [4]:

$$x_{*\delta,l} = x_0 \cdot L \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2}, \text{ о.е.}, \quad (20)$$

где « x_0 – удельное индуктивное сопротивление линии, Ом/км;

L – длина линии, км» [14].

«Питающая ВЛ-110 кВ имеет длину 15 км, следовательно, её сопротивление в относительных единицах при приведении к базисным условиям» [14]:

$$x_{\star\bar{6},l} = 0,4 \cdot 15 \cdot \frac{25}{115^2} = 0,01 \text{ о.е.}$$

«Напряжения коротких замыканий обмоток трехфазного трансформатора с расщепленной обмоткой» [14]:

$$U_{\kappa,\bar{6}} = u_{\kappa.BH-HH} - 0,25 \cdot u_{\kappa.HH1-HH2}, \quad (21)$$

$$U_{\kappa.H1} = U_{\kappa.H2} = 0,5 \cdot u_{\kappa.HH1-HH2}. \quad (22)$$

«Для силового трансформатора подстанции» [14]:

$$U_{\kappa,\bar{6}} = u_{\kappa.BH-HH} - 0,25 \cdot u_{\kappa.HH1-HH2} = 10,5 - 0,25 \cdot 30 = 3 \%,$$

$$U_{\kappa.H1} = U_{\kappa.H2} = 0,5 u_{\kappa.HH1-HH2} = 0,5 \cdot 30 = 15 \%.$$

«Сопротивления силового трансформатора» [9]:

$$x_{\star\bar{6},T_{\bar{6}}} = \frac{U_{\kappa,\bar{6}}, \%}{100} \frac{S_{\bar{6}}}{S_{номT}}, \quad (23)$$

$$x_{\star\bar{6},T_{H1}} = x_{\star\bar{6},T_{H2}} = \frac{U_{\kappa.H1}, \%}{100} \frac{S_{\bar{6}}}{S_{номT}}. \quad (24)$$

$$x_{\star\bar{6},T_{\bar{6}}} = \frac{3}{100} \cdot \frac{25}{25} = 0,03,$$

$$x_{\star\bar{6},T_{H1}} = x_{\star\bar{6},T_{H2}} = \frac{15}{100} \cdot \frac{25}{25} = 0,15.$$

«Результирующее сопротивление до точки К1» [14]:

$$x_{\star\text{рез}(\bar{6})} = x_{\star\bar{6},c} + x_{\star\bar{6},l}, \quad (25)$$

$$x_{\star\text{рез}(\bar{6})} = 0,025 + 0,01 = 0,035 \text{ о.е.}$$

Начальный трёхфазный ток короткого замыкания характеризует режим устойчивого протекания тока КЗ непосредственно после его возникновения и является базовым значением для выбора устройств релейной защиты и настройки их уставок [14]:

$$I_{n,o} = \frac{E''_{*\delta}}{x_{*рез(\delta)}} \cdot I_{\delta,KA}, \quad (26)$$

где $E''_{*\delta}$ – «сверхпереходная ЭДС, о. е.;

$x_{*рез(\delta)}$ – результирующее сопротивление до точки КЗ, о. е.» [14].

Ударный ток характеризует максимальное мгновенное значение тока КЗ, «возникающее в первый момент времени после начала короткого замыкания, определяя выбор коммутационного оборудования по параметрам электродинамической стойкости» [14]:

$$i_{y\delta} = \sqrt{2} \cdot I_{n,o} \cdot k_{y\delta}, \quad (27)$$

где $k_{y\delta}$ – «ударный коэффициент» [14].

«Начальное действующее значение периодической составляющей трехфазного тока короткого замыкания в точке К1» [14]:

$$I_{n,0,K1} = \frac{1}{0,035} \cdot 0,13 \approx 3,71 \text{ кА}.$$

«Ударный ток короткого замыкания в точке К1» [14]:

$$i_{y\delta,K1} = \sqrt{2} \cdot 3,71 \cdot 1,8 \approx 9,42 \text{ кА}.$$

«Аналогично проведён расчёт токов КЗ до точки К2» [14]:

$$x_{*рез(\bar{o})} = x_{*\bar{o},c} + x_{*\bar{o},л} + x_{*\bar{o},T_г} + x_{*\bar{o},T_{H1}}, \quad (28)$$

$$x_{*рез(\bar{o})} = 0,025 + 0,01 + 0,03 + 0,15 = 0,215 \text{ о.е.},$$

$$I_{n,o.K2} = \frac{1}{0,215} \cdot 1,31 = 6,09 \text{ кА},$$

$$i_{yд.K2} = \sqrt{2} \cdot 6,09 \cdot 1,4 = 12,03 \text{ кА}.$$

Результаты расчёта токов короткого замыкания занесены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты расчёта токов КЗ

Точка КЗ	Значение тока, кА
$I_{n,0}$ в точке К1	3,71
$i_{yд}$ в точке К1	9,42
$I_{n,0}$ в точке К2	6,09
$i_{yд}$ в точке К2	12,03

Полученные результаты используются в работе далее.

Выводы по разделу.

Получены значения токов короткого замыкания на подстанции 110/10/10 кВ «Самашки», которые дают основание для выбора оптимальных режимов функционирования сети, предотвращая возникновение аварийных ситуаций и гарантируя бесперебойность электроснабжения потребителей первой и второй категорий надёжности.

Выбор электрических аппаратов и проводников электрической схемы подстанции

Выбор электрических аппаратов и проводников на стороне 110 кВ подстанции

Выбор электрических аппаратов и проводников на стороне высокого напряжения 110 кВ подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» является важнейшим этапом проектирования, от качества выполнения которого зависит надёжность функционирования подстанции, безопасность её эксплуатации, а также минимизация технических потерь электроэнергии. Аппараты и проводники напряжением 110 кВ должны соответствовать высоким требованиям по механической и электрической прочности, обеспечивать стабильную и безопасную эксплуатацию оборудования в условиях воздействия высоких значений рабочих и аварийных токов, в том числе токов короткого замыкания.

Известно, что основное коммутационное и защитное оборудование (электрические аппараты) для напряжения 110 кВ должно отвечать современным требованиям к надёжности и быстродействию.

Для установки на подстанции выбраны современные высоковольтные элегазовые выключатели бакового типа марки ВЭБ-110П-40/2500 УХЛ1, которые характеризуются значительным ресурсом коммутаций, отсутствием необходимости частого обслуживания и высокой механической и электрической износостойкостью. Элегазовые выключатели эффективно обеспечивают надёжное и своевременное отключение линий при возникновении аварийных ситуаций, защищая силовые трансформаторы и другое высоковольтное оборудование подстанции.

Кроме того, данные аппараты отличаются компактными размерами, меньшими эксплуатационными расходами по сравнению с традиционными масляными выключателями, а также экологичностью за счёт герметичного исполнения и применения негорючего диэлектрического газа. Также для

установки на подстанции выбраны современные разъединители РН-СЭЩ-110/1000 УХЛ1, которые оснащены более быстродействующими и надёжными контактными системами и приводом, что «позволяет минимизировать аварийные режимы. Также на стороне 110 кВ подстанции предусматривается установка современных ограничителей перенапряжения марки ОПНп-110, обеспечивающих защиту основного оборудования» [10] от атмосферных и коммутационных перенапряжений. Данные аппараты обладают способностью быстро реагировать на всплески напряжения, минимизируя риск повреждения электрооборудования и значительно повышая эксплуатационную надёжность и безопасность объекта.

Кроме коммутационного оборудования, важное значение при комплектации распределительного устройства 110 кВ имеют измерительные трансформаторы тока и напряжения. На подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» выбраны современные трансформаторы напряжения марки ЗНОГ-110.

Данные аппараты имеют высокую точность измерения, что особенно важно для корректного функционирования систем релейной защиты и автоматики, а также для учёта электроэнергии и контроля качества электроснабжения. Данные аппаратов приняты из источника [10].

Результаты выбора и проверки электрических аппаратов для установки на стороне 110 кВ подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» сведены в таблицу 6.

В таблице 6 максимальные токи на выводах трансформаторов 110 кВ и 10 кВ определяются так:

$$I_{\max} = K_p \cdot \frac{S_{\text{ном.т.}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н.}}}, \quad (29)$$

$$I_{\max} = 1,4 \frac{25000}{\sqrt{3} \cdot 110} = 183,7 \text{ A},$$

$$I_{\max} = 1,4 \frac{25000}{\sqrt{3} \cdot 10} = 2023,1 \text{ A},$$

Таблица 6 – Результаты выбора и проверки электрических аппаратов для установки на стороне 110 кВ подстанции 110/10/10 кВ «Самашки»

Расчетные данные	Каталожные данные	Условия выбора
Выключатель ВЭБ-110П-40/2500 УХЛ1		
$U_{ном} = 110 \text{ кВ}$	$U_{сет.ном} = 110 \text{ кВ}$	$U_{ном} \leq U_{сет.ном}$
$I_{max} = 183,7 \text{ А}$	$I_{ном} = 2500 \text{ А}$	$I_{max} \leq I_{ном}$
$I_{н,т} = 3,71 \text{ кА}$	$I_{откл.ном} = 40 \text{ кА}$	$I_{н,т} \leq I_{откл.ном}$
$I_{н,о} = 3,71 \text{ кА}$	$I_{вкл.ном} = 40 \text{ кА}$	$I_{н,о} \leq I_{вкл.ном}$
$I_{н,о} = 3,71 \text{ кА}$	$I_{пр.с} = 102 \text{ кА}$	$I_{н,о} \leq I_{пр.с}$
$i_{уд} = 9,42 \text{ кА}$	$i_{пр.с} = 102 \text{ кА}$	$i_{уд} \leq i_{пр.с}$
$i_{уд} = 9,42 \text{ кА}$	$i_{вкл.ном} = 31,5 \text{ кА}$	$i_{уд} \leq i_{вкл.ном}$
$B_{красч} = 41,3 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{квыкл} = 29760 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{красч} \leq B_{квыкл}$
Разъединитель РН-СЭЩ-110/1000 УХЛ1		
$U_{ном} = 110 \text{ кВ}$	$U_{сет.ном} = 110 \text{ кВ}$	$U_{ном} \leq U_{сет.ном}$
$I_{max} = 183,7 \text{ А}$	$I_{ном} = 1000 \text{ А}$	$I_{max} \leq I_{ном}$
$i_{уд} = 9,42 \text{ кА}$	$i_{пр.с} = 100 \text{ кА}$	$i_{уд} \leq i_{пр.с}$
$B_{красч} = 41,3 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{краз} = 8280 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{красч} \leq B_{краз}$
Трансформатор тока ТВТ-110-I (встроенные)		
$U_{ном} = 110 \text{ кВ}$	$U_{сет.ном} = 110 \text{ кВ}$	$U_{ном} \leq U_{сет.ном}$
$I_{max} = 183,7 \text{ А}$	$I_{1ном} = 200 \text{ А}$	$I_{max} \leq I_{1ном}$
$i_{уд} = 9,42 \text{ кА}$	$i_{дин} = 160 \text{ кА}$	$i_{уд} \leq i_{дин}$
$B_{красч} = 41,3 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{кТТ} = 11900 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{красч} \leq B_{кТТ}$
Трансформатор напряжения марки ЗНОГ-110/УХЛ1		
$U_{ном} = 110 \text{ кВ}$	$U_{сет.ном} = 110 \text{ кВ}$	$U_{ном} \leq U_{сет.ном}$
$S_{2\Sigma} \leq 150 \text{ ВА}$	$S_{ном} = 150 \text{ ВА}$	$S_{2\Sigma} \leq S_{ном}$
Ограничитель перенапряжения марки ОПНп-110/800/146-10-III-УХЛ1		
$U_{ном} = 110 \text{ кВ}$	$U_{сет.ном} = 110 \text{ кВ}$	$U_{ном} \leq U_{сет.ном}$
$I_{max} = 183,7 \text{ А}$	$I_{ном} = 800 \text{ А}$	$I_{max} \leq I_{ном}$
$I_{н,т} = 3,71 \text{ кА}$	$I_{откл.ном} = 31,5 \text{ кА}$	$I_{н,т} \leq I_{откл.ном}$
$i_{уд} = 9,42 \text{ кА}$	$i_{пр.с} = 146 \text{ кА}$	$i_{уд} \leq i_{пр.с}$
$B_{красч} = 41,3 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{квыкл} = 14260 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{красч} \leq B_{квыкл}$

Все выбранные электрические аппараты 110 кВ ПС 110/10/10 кВ «Самашки», показаны в графической части работы.

Далее проводится расчёт и выбор проводников на стороне 110 кВ подстанции 110/10/10 кВ «Самашки».

Выбирается питающая «линия, которая будет установлена на подстанции для питания силовых трансформаторов на стороне 110 кВ.

Выбор проводников питающей воздушной линии 110 кВ проводится» [15] с учётом технических условий эксплуатации, климатических и нагрузочных характеристик.

«Выбор сечения проводников напряжением выше 1 кВ проводится по экономической плотности тока» [15]:

$$F_{\text{э}} = \frac{I_{\text{раб}}}{j_{\text{э}}}, \text{ мм}^2, \quad (30)$$

где $I_{\text{р.}}$ - «значение расчётного тока нормального режима, А» [15].

«Проверка проводников напряжением выше 1 кВ проводится по допустимому нагреву в нормальном режиме» [15]:

$$I_{\text{дон}} \geq I_{\text{раб}}, \quad (31)$$

где « $I_{\text{дон}}$ – допустимый ток линии, А [4].

«Вторым проверочным условием для проводников напряжением выше 1 кВ, является проверка их сечения по условию допустимого перегрева в послеаварийном (максимальном) режиме» [15]:

$$I_{\text{дон}} \geq I_{\text{max}}, \quad (32)$$

где « I_{max} – максимальный ток линии (послеаварийный режим), А» [15].

«Ток линии в послеаварийном (максимальном) режиме» [15]:

$$I_{max} = K_p \cdot I_{раб}, \quad (33)$$

где « K_p – коэффициент резервирования» [15].

Кроме того, проверка на механическую прочность (устойчивость) выбранных проводников также предполагает выполнение следующего условия [15]:

$$S_{ст} \geq S_{мин}, \quad (34)$$

где $S_{ст}, S_{мин}$ – «соответственно, стандартное сечение выбранного проводника и минимальное сечение проводника в данном классе напряжения, мм²» [15].

Проводится выбор сечения питающей воздушной линии напряжением 110 кВ по приведённым выше условиям.

Рабочий ток питающей линии 110 кВ, в отличие от тока отходящих линий напряжением 10 кВ, определяется номинальным током силового трансформатора подстанции на стороне 110 кВ:

$$I_{раб} = \frac{S_{ном.т}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}, \quad A, \quad (35)$$

$$I_{раб} = \frac{25000}{\sqrt{3} \cdot 110} = 131,2 \text{ A}.$$

Расчётное сечение питающей линии 110 кВ:

$$F_{\text{э.}} = \frac{131,2}{1,1} = 119,3 \text{ мм}^2.$$

Для питающей воздушной линии 110 кВ подстанции принимается провод сечением 120 мм².

Таким образом, в работе окончательно принимается воздушная линия с проводом марки АС-120/19 с $I_{доп} = 390$ А [4].

«Проверка выбранного проводника марки АС-120/19 с $I_{доп} = 390$ А в нормальном режиме выполняется» [15]:

$$390 \text{ А} \geq 131,2 \text{ А}.$$

«Ток воздушной линии в послеаварийном (максимальном) режиме определён в работе ранее при выборе и проверке электрических аппаратов напряжением 110 кВ.

Проверка выбранного проводника марки АС-120/19 с $I_{доп} = 390$ А в послеаварийном режиме выполняется» [15]:

$$390 \text{ А} \geq 183,7 \text{ А}.$$

«Известно, что минимально допустимое сечение для воздушной линии 110 кВ составляет 120 мм².

Значит, проверка по допустимой механической прочности» [15], также выполняется:

$$120 \text{ мм}^2 = 120 \text{ мм}^2.$$

Таким образом, на питающей линии напряжением 110 кВ подстанции 110/10/10 кВ «Самашки», обусловлено применение сечения проводника марки АС-120/19 с $I_{доп} = 390$ А.

На основании проведённых расчётов установлено, что все выбранные аппараты и проводники на стороне 110 кВ подстанции «Самашки»

обеспечивают выполнение нормативных требований по надёжности, безопасности, энергоэффективности, а также обладают достаточным запасом по термической и электродинамической стойкости при расчётных токах короткого замыкания.

Применение данных решений позволит существенно повысить уровень технического состояния системы электроснабжения объекта, обеспечить стабильность энергоснабжения потребителей второй категории надёжности и снизить эксплуатационные затраты на обслуживание оборудования в долгосрочной перспективе.

Выбор электрических аппаратов и проводников на стороне 10 кВ подстанции

«Далее в работе проводится выбор электрических аппаратов и проводников на стороне 10 кВ подстанции 110/10/10 кВ «Самашки».

Для РУ-10 кВ подстанции выбирается для применения комплектное распределительное устройство с выкатным элементом и ячейками марки К-204ЭП (производитель - ООО «ТРАНСЭНЕРГО») [20].

Для компоновки КРУ с выбранными ячейками марки К-204ЭП на стороне 10 кВ подстанции 110/10/10 кВ «Самашки», выбирается и проверяется следующее современное оборудование:

- современные вакуумные выключатели марки ВВ-СВЭЛ-10/2500-У2;
- современные разработки трансформаторов тока марки ТОЛ-СЭЩ-10-21;
- современные разработки трансформаторов напряжения марки ЗНОЛ-СЭЩ-10;
- современные ограничители перенапряжения марки ОПН-П-10/12,7/10/1,1.

Далее проводится аргументация выбора данных технических решений.

Выбранный тип КРУ характеризуется высокой степенью безопасности, удобством обслуживания и ремонта, минимальными габаритами и модульностью конструкции, что позволяет существенно упростить процесс эксплуатации и повысить надёжность электроснабжения потребителей.

В составе выбранных ячеек К-204ЭП предусмотрена установка современных вакуумных выключателей марки ВВ-СВЭЛ-10/2500-У2. Выбор данного типа вакуумных выключателей обусловлен их улучшенными характеристиками по сравнению с устаревшими аналогами, включая высокую коммутационную способность, низкие эксплуатационные затраты, повышенную механическую и коммутационную стойкость и отсутствие необходимости в частом обслуживании. Вакуумные выключатели ВВ-СВЭЛ-10/2500-У2 обеспечивают надёжную коммутацию нагрузочных токов и оперативное отключение токов коротких замыканий, что существенно увеличивает уровень безопасности и оперативности работы системы электроснабжения подстанции.

Для обеспечения точности измерения и надёжной работы устройств релейной защиты и автоматики, систем телеметрии и коммерческого учёта электроэнергии на стороне 10 кВ подстанции выбраны трансформаторы тока марки ТОЛ-СЭЩ-10-21 и трансформаторы напряжения марки ЗНОЛ-СЭЩ-10.

Для защиты оборудования распределительного устройства 10 кВ подстанции от импульсных перенапряжений различного происхождения, включая коммутационные и атмосферные перенапряжения, в ячейках предусмотрена установка современных ограничителей перенапряжения марки ОПН-П-10.

Выбранные ОПН характеризуются высокой скоростью реакции на перенапряжения, высокой отключающей способностью, длительным сроком службы и минимальными требованиями к техническому обслуживанию.

Результаты выбора и проверки электрических аппаратов для установки на стороне 10 кВ подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» сведены в таблицу 7.

Таблица 7 – Результаты выбора и проверки электрических аппаратов для установки на стороне 110 кВ подстанции 110/10/10 кВ «Самашки»

Расчетные данные	Каталожные данные	Условия выбора
Выключатель ВВ-СВЭЛ-10/2500-У2		
$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$	$U_{сет.ном} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} \leq U_{сет.ном}$
$I_{max} = 2023,1 \text{ А}$	$I_{ном} = 2500 \text{ А}$	$I_{max} \leq I_{ном}$
$I_{н,т} = 6,09 \text{ кА}$	$I_{откл.ном} = 40 \text{ кА}$	$I_{н,т} \leq I_{откл.ном}$
$I_{н,о} = 6,09 \text{ кА}$	$I_{вкл.ном} = 40 \text{ кА}$	$I_{н,о} \leq I_{вкл.ном}$
$I_{н,о} = 6,09 \text{ кА}$	$I_{пр.с} = 102 \text{ кА}$	$I_{н,о} \leq I_{пр.с}$
$i_{уд} = 12,03 \text{ кА}$	$i_{пр.с} = 102 \text{ кА}$	$i_{уд} \leq i_{пр.с}$
$i_{уд} = 12,03 \text{ кА}$	$i_{вкл.ном} = 31,5 \text{ кА}$	$i_{уд} \leq i_{вкл.ном}$
$B_{расч} = 111,3 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{квыкл} = 29760 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{расч} \leq B_{квыкл}$
Трансформатор тока ТОЛ-СЭЦ-10-21		
$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$	$U_{сет.ном} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} \leq U_{сет.ном}$
$I_{max} = 2023,1 \text{ А}$	$I_{ном} = 2500 \text{ А}$	$I_{max} \leq I_{ном}$
$i_{уд} = 12,03 \text{ кА}$	$i_{дин} = 160 \text{ кА}$	$i_{уд} \leq i_{дин}$
$B_{расч} = 111,3 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{кТТ} = 11900 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{расч} \leq B_{кТТ}$
Трансформатор напряжения марки НАМИ-СЭЦ-10		
$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$	$U_{сет.ном} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} \leq U_{сет.ном}$
$S_{2\Sigma} \leq 75 \text{ ВА}$	$S_{ном} = 75 \text{ ВА}$	$S_{2\Sigma} \leq S_{ном}$
Ограничитель перенапряжения марки ОПН-П-10/12,7/10/1,1		
$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$	$U_{сет.ном} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} \leq U_{сет.ном}$
$I_{max} = 2023,1 \text{ А}$	$I_{ном} = 2500 \text{ А}$	$I_{max} \leq I_{ном}$
$I_{н,т} = 6,09 \text{ кА}$	$I_{откл.ном} = 40 \text{ кА}$	$I_{н,т} \leq I_{откл.ном}$
$i_{уд} = 12,03 \text{ кА}$	$i_{пр.с} = 120 \text{ кА}$	$i_{уд} \leq i_{пр.с}$
$B_{расч} = 111,3 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{квыкл} = 14260 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{расч} \leq B_{квыкл}$

Все выбранные электрические аппараты 10 кВ ПС 110/10/10 кВ «Самашки», показаны в графической части работы.

Далее проводится расчёт и выбор проводников на стороне 10 кВ подстанции 110/10/10 кВ «Самашки».

Результаты выбора и проверки отходящих кабельных линий марки АСБ-10 [5] к потребителям 10 кВ подстанции, представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты выбора отходящих кабельных линий к потребителям 10 кВ подстанции 110/10/10 кВ «Самашки»

Номер линии	Состав потребителей	I_p , А	I_{max} , А	Марка кабеля	$I_{доп}$, А
Л1	Бытовая и коммунальная нагрузка	307,1	429,9	2АСБ-10 (3×120)	2×218=436,0
Л2	Бытовая и коммунальная нагрузка	307,1	429,9	2АСБ-10 (3×120)	2×218=436,0
Л3	Бытовая и коммунальная нагрузка	307,1	429,9	2АСБ-10 (3×120)	2×218=436,0
Л4	Бытовая и коммунальная нагрузка	307,1	429,9	2АСБ-10 (3×120)	2×218=436,0
Л5	Бытовая и коммунальная нагрузка	307,1	429,9	2АСБ-10 (3×120)	2×218=436,0
Л6	Бытовая и коммунальная нагрузка	307,1	429,9	2АСБ-10 (3×120)	2×218=436,0
Л7	Бытовая и коммунальная нагрузка	307,1	429,9	2АСБ-10 (3×120)	2×218=436,0
Л8	Бытовая и коммунальная нагрузка	307,1	429,9	2АСБ-10 (3×120)	2×218=436,0

Таким образом, для канализации электроэнергии на стороне 10 кВ подстанции 110/10/10 кВ «Самашки», с целью качественного питания потребителей, на всех отходящих линиях выбраны по два силовых кабеля марки АСБ-10 (3×120).

Расчётным путём установлено, что применение данных современных кабельных линий с выбранными сечениями проходит проверку как в нормальном, так и в максимальном (послеаварийном) режимах работы подстанции.

В результате проведённого выбора и анализа электрических аппаратов и комплектующих для РУ-10 кВ подстанции «Самашки» установлено, что предложенные решения соответствуют современным нормативным требованиям, обеспечивают необходимые показатели надёжности и безопасности, способствуют повышению энергоэффективности эксплуатации объекта и являются оптимальными с точки зрения технических и экономических характеристик.

Все принятые решения по выбранным электрическим аппаратам и проводникам показаны в графической части работы.

Выводы по разделу.

На стороне 110 кВ подстанции 110/10/10 кВ «Самашки», выбрано и проверено следующее современное оборудование открытой установки:

- современные элегазовые выключатели марки ВЭБ-110П-40/2500 УХЛ1;
- современные разъединители РН-СЭЩ-110/1000 УХЛ1;
- трансформаторы напряжения марки ЗНОГ-110/УХЛ1
- ограничители перенапряжения марки ОПНп-110/800/146-10-III-УХЛ1
- встроенные в выключатели трансформаторы тока марки ТВТ-110-I.

На питающей линии напряжением 110 кВ подстанции 110/10/10 кВ «Самашки», обусловлено применение сечения проводника марки АС-120/19 с $I_{don} = 390$ А.

На основании проведённых расчётов установлено, что все выбранные аппараты и проводники на стороне 110 кВ подстанции «Самашки» обеспечивают выполнение нормативных требований по надёжности, безопасности, энергоэффективности, а также обладают достаточным запасом по термической и электродинамической стойкости при расчётных токах короткого замыкания.

Применение данных решений позволит существенно повысить уровень технического состояния системы электроснабжения объекта, обеспечить стабильность энергоснабжения потребителей второй категории надёжности и снизить эксплуатационные затраты на обслуживание оборудования в долгосрочной перспективе.

Для РУ-10 кВ подстанции выбрано для применения комплектное распределительное устройство с выкатным элементом и ячейками марки К-204ЭП (производитель - ООО «ТРАНСЭНЕРГО») [20].

Для компоновки КРУ с выбранными ячейками марки К-204ЭП на стороне 10 кВ подстанции 110/10/10 кВ «Самашки», выбрано и проверено следующее современное оборудование:

- современные вакуумные выключатели марки ВВ-СВЭЛ-10/2500-У2;
- современные разработки трансформаторов тока марки ТОЛ-СЭЩ-10-21;
- современные разработки трансформаторов напряжения марки ЗНОЛ-СЭЩ-10;
- современные ограничители перенапряжения марки ОПН-П-10/12,7/10/1,1.

Для канализации электроэнергии на стороне 10 кВ подстанции 110/10/10 кВ «Самашки», с целью качественного питания потребителей, на всех отходящих линиях выбраны по два силовых кабеля марки АСБ-10 (3×120).

В результате проведённого выбора и анализа электрических аппаратов и комплектующих для РУ-10 кВ подстанции «Самашки» установлено, что предложенные решения соответствуют современным нормативным требованиям, обеспечивают необходимые показатели надёжности и безопасности, способствуют повышению энергоэффективности эксплуатации объекта и являются оптимальными с точки зрения технических и экономических характеристик.

.

Собственные нужды и система заземления подстанции

5.1 Расчёт системы собственных нужд подстанции

Далее в работе проводится расчёт системы собственных нужд подстанции.

«Известно, что система собственных нужд (СН) подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» является важнейшей составной частью энергетического объекта, обеспечивающей функционирование технологического оборудования, систем управления, релейной защиты» [9] и автоматики, а также жизнеобеспечения помещений.

Надёжность и бесперебойность электроснабжения собственных нужд подстанции определяют её работоспособность и эксплуатационную безопасность всего энергетического объекта в целом.

К основному оборудованию системы собственных нужд подстанции «Самашки» относятся силовые понижающие трансформаторы собственных нужд, которые понижают напряжение с уровня 10 кВ до уровня 0,4 кВ.

Данные трансформаторы отличаются повышенной надёжностью, безопасностью и удобством технического обслуживания, так как выполнены по специальной технологии в герметичном исполнении без применения расширительного бака и имеют высокий КПД.

Кроме трансформаторов, в состав СН входит низковольтное распределительное устройство (РУ-0,4 кВ), предназначенное для приёма и распределения электроэнергии на потребители собственных нужд.

В качестве такого устройства выбрано комплектное низковольтное распределительное устройство с секционированием и автоматическим вводом резерва (АВР), выполненное в виде комплектных распределительных шкафов серии ЩО-70.

Потребителями собственных нужд подстанции являются системы технологического и аварийного освещения помещений распределительных

устройств 110 и 10 кВ, наружное и периметральное освещение территории объекта, системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха в помещениях распределительных устройств и служебных зданиях, противопожарные системы (автоматическая пожарная сигнализация, системы пожаротушения), а также системы охраны, видеонаблюдения и технологического контроля.

Для оперативного питания выбран щит постоянного оперативного тока (ЩПТ), комплектуемый аккумуляторной батареей (АБ), выпрямительно-зарядным устройством и распределительными шкафами постоянного тока.

Применение постоянного оперативного тока обосновано высокими требованиями по надёжности функционирования систем релейной защиты, управления и автоматики, поскольку именно постоянный ток способен обеспечить стабильное и бесперебойное электроснабжение в случае аварийного отключения основных источников переменного тока.

Выбор оперативного постоянного тока на подстанции обусловлен следующими факторами: высоким уровнем автономности, возможностью длительного поддержания работоспособности цепей управления и релейной защиты даже в условиях аварийного режима (например, при полном отключении внешних источников питания), а также устойчивостью к «помехам и стабильностью параметров питания, что особенно важно для цифровых микропроцессорных устройств. Внедрение такой системы обеспечивает своевременное срабатывание устройств защиты и автоматики, что позволяет оперативно устранить аварийные ситуации» [9] и предотвратить повреждения основного оборудования подстанции.

Таким образом, выбранное оборудование и технические решения для системы собственных нужд подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» обеспечивают высокий уровень надёжности и безопасности её функционирования и соответствуют требованиям, предъявляемым современным нормативно-техническим документам в области энергетики Российской Федерации.

Ранее в работе было установлено, что для обеспечения питания СН подстанции, на ней требуется установка двух трансформаторов собственных нужд (ТСН). Проводится выбор данных трансформаторов с последующей проверкой на перегрузочную способность, для чего на первом этапе осуществляется расчёт нагрузки системы СН.

«Расчетная активная мощность СН» [9]:

$$P_p = \alpha \cdot P_{ном}, \quad (36)$$

где « α – коэффициент спроса потребителей;

$P_{ном}$ – номинальная мощность потребителей СН» [9].

«Номинальная активная нагрузка системы СН подстанции» [9]:

$$P_{ном} = P_{ном.ед} \cdot n, \quad (37)$$

где « $P_{ном.ед}$ – номинальная мощность СН;

n – число единиц однотипного оборудования СН, шт.» [9].

«Расчетная реактивная нагрузка системы СН подстанции» [9]:

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (38)$$

где « $\operatorname{tg} \varphi$ – коэффициент мощности потребителей СН» [9].

«Расчетная полная нагрузка системы СН подстанции» [9]:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}. \quad (39)$$

«Расчётная нагрузка наружного освещения подстанции» [9]:

$$P_{ном} = 0,5 \cdot 2 = 1 \text{ кВт},$$

$$P_p = 1 \cdot 1 = 1 \text{ кВт},$$

$$Q_p = 1 \cdot 0 = 0 \text{ квар},$$

$$S_p = \sqrt{1^2 + 0^2} = 1 \text{ кВА}.$$

Результаты расчёта нагрузок системы СН представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Результаты расчёта нагрузок системы СН подстанции

Нагрузка	Кол- во, ед.	Номинальная мощность, кВт		$\cos\varphi$	$\tan\varphi$	Расчетная нагрузка		
		одного	общая			α	P_p , кВт	Q_p , квар
Основное питание ОПУ	1	35	35	0,9	0,48	0,7	24,5	11,8
Резервное питание ОПУ	1	12	12	0,8	0,75	1,0	12,0	9,0
АКБ (система постоянного оперативного тока)	2	8	16	0,9	0,48	0,5	8,0	3,8
РПН трансформаторов Т1 и Т2	2	1	2	0,85	0,62	0,7	1,4	0,9
Охлаждение трансформаторов Т1 и Т2	12	0,75	9	0,85	0,62	0,85	7,7	4,7
Обогрев РПН трансформаторов Т1 и Т2	1	4	4	1,0	0	1,0	4,0	0,0
Наружное освещение территории	2	0,5	1	1,0	0	1,0	1,0	0,0
Обогрев, вентиляция и отопление ячеек и оборудования КРУ 10 кВ	1	25	25	0,95	0	0,7	17,5	0,0
Обогрев, вентиляция и отопление оборудования ОРУ 110 кВ	1	20	20	0,95	0	0,7	14	0,0
Телемеханика, видеонаблюдение, сигнализация и автоматика	1	8	8	0,7	0,39	1,0	8,0	3,1
Аварийное освещение	1	0,3	0,3	1,0	0	1,0	0,3	0,0
Питание цепей блокировки и резервных цепей	1	1	1	0,9	0,48	1,0	1,0	0,5
Итого по системе СН подстанции	26	115,55	133,3	0,88	0,48	0,85	99,4	33,8

«Полная нагрузка системы СН подстанции» [9]:

$$S_p = \sqrt{99,4^2 + 33,8^2} = 104,9 \text{ кВА}.$$

«Мощность силового трансформатора системы собственных нужд определяется по условию» [9]:

$$S_{\text{ном.т.р.}} \geq \frac{S_p}{N \cdot K_3}, \quad (40)$$

где « S_p – значение полной расчётной нагрузки системы СН подстанции;

N – количество ТСН на подстанции, ед.;

K_3 – нормативный коэффициент загрузки ТСН подстанции» [9].

Выбор мощности ТСН:

$$S_{\text{ном.т.р.}} \geq \frac{104,9}{2 \cdot 0,85} \approx 61,7 \text{ кВА}.$$

Для применения в системе СН подстанции, выбраны два ТСН марки ТСЛ-63/10.

Проверка ТСН марки ТСЛ-63/10, на соответствие нагрузке потребителей системы СН подстанции, выполняется:

$$63 \text{ кВА} \geq \frac{104,9}{2 \cdot 0,85} \approx 61,7 \text{ кВА}.$$

В результате проведения расчётов подтверждено, что выбранный ТСН марки ТСЛ-63/10 удовлетворяет всем условиям выбора. Таким образом, окончательно принимаются к установке два ТСН указанной марки.

5.2 Расчёт системы заземления подстанции

«Известно, что заземляющее устройство на понизительных подстанциях является важнейшим условием для обеспечения безопасности персонала и безотказности работы оборудования» [12]. Данный расчёт обязателен при проектировании новых энергетических объектов.

Поэтому расчёт заземляющего устройства на подстанции 110/10/10 кВ «Самашки», проводимый в работе, представляет собой обязательный этап, направленный на обеспечение необходимого уровня электробезопасности для персонала, защиту оборудования и гарантированное отведение в землю токов короткого замыкания и импульсных токов молнии.

Данный расчёт актуален по причине необходимости соответствия сооружаемых и модернизируемых подстанций строгим нормативным требованиям, отражённым в [12], а также обеспечения безопасных условий эксплуатации и долговечности электрических установок [11], [13].

Кроме того, на подстанциях контур заземления всегда должен быть связан с молниезащитой [18].

Основной задачей расчёта заземления является выбор рациональной конструкции заземляющего устройства, состоящей из вертикальных и горизонтальных электродов, позволяющей достичь нормативного сопротивления заземления, регламентируемого на уровне не выше 0,5 Ом для энергообъектов класса напряжения 110 кВ.

При выборе конструкции заземляющего устройства учитываются характеристики грунтов, прежде всего удельное электрическое сопротивление, глубина залегания грунтовых вод, тип почвы, влажность и климатические особенности региона.

В условиях климата региона, характеризующегося гористой местностью и континентальным климатом с выраженными сезонными колебаниями температуры и влажности, необходимо применять систему заземления,

обеспечивающую устойчивые показатели сопротивления заземляющих устройств в течение всего периода эксплуатации подстанции.

Вертикальные электроды обеспечивают глубокий контакт с грунтом и стабильность сопротивления контура заземления в течение всего срока эксплуатации, что особенно важно при значительных изменениях влажности и температуры.

Горизонтальные электроды, соединяющие вертикальные элементы между собой, создают равномерное распределение токов в грунте, минимизируя локальные перегрузки и снижая опасность возникновения напряжения шага и прикосновения до безопасных уровней.

Также известно, что конструктивно заземляющий контур должен охватывать всю территорию подстанции и быть соединён с фундаментами зданий, конструкциями металлических опор оборудования, металлическими оболочками и арматурой кабельных линий для создания единой системы уравнивания потенциалов.

Расчёт количества и длины вертикальных электродов проводится путём анализа величины удельного сопротивления грунта и необходимых параметров сопротивления контура заземления.

Максимальное допустимое время на подстанции, во время которого существует опасность человека попасть под удар электрическим током [12]:

$$\tau_{\text{в}} = t_{\text{р.з.}} + t_{\text{откл.в}}, \text{ с.} \quad (41)$$

где $t_{\text{р.з.}}$ – время срабатывания релейной защиты;

$t_{\text{откл.в}}$ – полное время отключения выключателя на подстанции в результате действия РЗА.

«Для условий ПС-110/10/10 кВ «Самашки», с учётом наличия быстродействующей релейной защиты в случае попадания человека под напряжение» [11]:

$$\tau_{\epsilon} = 0,1 + 0,035 = 0,135 \text{ с.}$$

«Сопротивление растекания тока от ступней человека» [11]:

$$R_c = 1,5 \cdot \rho, \text{ Ом.} \quad (42)$$

«С учётом специфики оборудования и грунта подстанции» [11]:

$$R_c = 1,5 \cdot 0,009 = 0,0135 \text{ Ом.}$$

«Коэффициент сопротивления тела человека с учётом растекания тока от ступней» [11]:

$$\beta = \frac{R_q}{R_q + R_c}, \quad (43)$$

$$\beta = \frac{1000}{1000 + 0,0135} = 0,99.$$

«Определяется суммарная длина горизонтального заземлителя» [11]:

$$L_r = \frac{130}{5} \cdot 48 + \frac{48}{5} \cdot 130 = 2496 \text{ м.}$$

«Коэффициент напряжения прикосновения» [11]:

$$K_n = \frac{M \cdot \beta}{\left(\frac{l_{\epsilon} \cdot L_r}{a \cdot \sqrt{S}} \right)^{0,45}}, \quad (44)$$

$$K_n = \frac{0,5 \cdot 0,99}{\left(\frac{5 \cdot 2496}{5 \cdot \sqrt{130 \cdot 48}} \right)^{0,45}} = 0,105.$$

«Напряжение на заземлителе контура заземления подстанции» [11]:

$$U_3 = \frac{U_{np.дон.}}{K_n}, \text{кВ}, \quad (45)$$

$$U_3 = \frac{400}{0,105} = 3810 \text{ В} = 3,81 \text{ кВ}.$$

«Сопротивление заземляющего устройства подстанции» [11]:

$$R_{з.дон.} = \frac{U_3}{I_3}, \text{Ом}, \quad (46)$$

$$R_{з.дон.} = \frac{3,81}{1,3} = 2,931 \text{ Ом}.$$

«Число ячеек по стороне квадрата контура заземления» [11]:

$$m = \frac{L_r}{2 \cdot \sqrt{S}} - 1, \quad (47)$$

$$m = \frac{2496}{2 \cdot \sqrt{130 \cdot 48}} - 1 = 14,8.$$

«Принимается $m=15$.

«Длина полос в контуре заземления подстанции» [11]:

$$L_r^{15} = 2 \cdot \sqrt{S} \cdot (m+1), \text{м}, \quad (48)$$

$$L_r^{15} = 2 \cdot \sqrt{130 \cdot 48} \cdot (15+1) = 2528 \text{ м}.$$

«Длина сторон ячеек» [11]:

$$b = \frac{\sqrt{S}}{m}, \text{ м}, \quad (49)$$

$$b = \frac{\sqrt{130 \cdot 48}}{15} = 5,5 \text{ м}.$$

«Число вертикальных заземлителей по периметру контура заземления» [11]:

$$n_{\text{г}} = \frac{\sqrt{S} \cdot 4}{\frac{a}{l_{\text{г}}} \cdot l_{\text{г}}}. \quad (50)$$

При этом важно выбрать оптимальное количество электродов, обеспечивающее достижение требуемых показателей безопасности при минимальных экономических затратах.

В качестве вертикальных электродов применяются омеднённые стальные стержни длиной 5 метров, которые обеспечивают долговечность, устойчивость к коррозии и стабильность характеристик в течение длительного времени эксплуатации:

$$n_{\text{г}} = \frac{\sqrt{130 \cdot 48} \cdot 4}{5} = 63,2.$$

«Принимается $n_{\text{г}}=64$. Суммарная длина вертикальных заземлителей в контуре заземления» [11]:

$$L_{\text{г}} = l_{\text{г}} \cdot n_{\text{г}}, \text{ м}, \quad (51)$$

$$L_{\text{г}} = 5 \cdot 64 = 320 \text{ м}.$$

«Относительная глубина заложения сетки электродов» [11]:

$$A = 0,444 - 0,84 \cdot \frac{l_{\epsilon} + t}{\sqrt{S}}, \text{ м}, \quad (52)$$

$$A = 0,444 - 0,84 \cdot \frac{5 + 0,7}{\sqrt{130 \cdot 48}} = 0,384 \text{ м}.$$

«Общее сопротивление сложного заземлителя» [11]:

$$R_3 = A \cdot \frac{\rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{L_r^{16} + L_{\epsilon}}, \text{ Ом}, \quad (53)$$

$$R_3 = 0,384 \cdot \frac{0,009}{\sqrt{130 \cdot 48}} + \frac{0,009}{2528 + 320} = 4,685 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}.$$

«Общее сопротивление сложного заземлителя спроектированного контура заземления ПС-110/10/10 кВ «Самашки» удовлетворяет минимальным условиям проверки» [11]:

$$R_3 = 4,685 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \leq R_{3, \text{ доп.}} = 2,931 \text{ Ом}.$$

«Данное значение сопротивления заземлителя является допустимым.

Напряжение прикосновения в спроектированном контуре заземления ПС-110/10/10 кВ «Самашки» [11]:

$$U_{np} = K_n \cdot R_3 \cdot I_3, \text{ В}, \quad (54)$$

$$U_{np} = 0,105 \cdot 4,658 \cdot 10^{-5} \cdot 1,3 = 6,358 \cdot 10^{-3} \text{ В}.$$

Таким образом, на основании проведённых расчётов установлено, что оптимальным решением для обеспечения нормативного сопротивления контура заземления на подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» является

применение 64 вертикальных заземляющих электродов длиной по 5 метров каждый.

Указанное количество электродов позволяет добиться необходимого уровня электробезопасности и гарантирует надёжное отведение токов короткого замыкания в грунт, обеспечивая безопасные условия эксплуатации оборудования и защиту персонала подстанции.

Выводы по разделу.

В результате проведения расчётов установлено, что ТСН марки ТСЛ-63/10 отвечают всем условиям выбора и проверок на нагрузочную способность.

Таким образом, окончательно приняты к установке два ТСН указанной марки.

Кроме того, показано, что данные трансформаторы отличаются повышенной надёжностью, безопасностью и удобством технического обслуживания, так как выполнены по специальной технологии в герметичном исполнении без применения расширительного бака и имеют высокий КПД.

В качестве РУ-0,4 кВ системы СН выбрано комплектное низковольтное распределительное устройство с секционированием и АВР, выполненное в виде комплектных распределительных шкафов серии ЩО-70.

На основании проведённых расчётов установлено, что оптимальным решением для обеспечения нормативного сопротивления контура заземления на подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» является применение 64 вертикальных заземляющих электродов длиной по 5 метров каждый и расстоянием 5 м между соседними электродами.

Указанное количество электродов, соединённых в форме замкнутой сетки без разрывов цепи, позволяет добиться необходимого уровня электробезопасности, гарантируя безопасные условия эксплуатации оборудования и защиту персонала понизительной подстанции «Самашки».

Релейная защита и автоматика элементов подстанции

Выбор надёжной и «эффективной системы релейной защиты и автоматики (РЗА) является ключевым аспектом проектирования и эксплуатации современной электрической подстанции, что особенно актуально для проектируемой подстанции» [1] 110/10/10 кВ «Самашки».

Современные энергосистемы характеризуются высокой сложностью схем и значительным уровнем нагрузок, что приводит к повышению вероятности возникновения аварийных и ненормальных режимов работы, которые могут сопровождаться тяжёлыми последствиями для электрооборудования, электросетей и потребителей электроэнергии.

При этом функционирование подстанций в условиях экстремальных климатических воздействий и высокой динамичности электрических нагрузок требует применения таких систем защиты и автоматики, которые способны эффективно, быстро и надёжно определять и устранять возникающие аварийные ситуации.

Релейная защита и автоматика подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» должна обеспечивать высокий уровень быстродействия и селективности для надёжного отключения повреждённых участков электрической сети, минимизации времени и площади распространения аварий, исключения ложных срабатываний и, соответственно, обеспечения бесперебойного энергоснабжения потребителей второй категории надёжности, подключённых к данному объекту.

Современные системы РЗА обеспечивают не только защиту оборудования от токов короткого замыкания и других ненормальных режимов, но и позволяют эффективно управлять режимами электроснабжения, осуществлять мониторинг состояния электрооборудования в реальном времени, прогнозировать и своевременно предотвращать развитие неисправностей и аварийных ситуаций.

Благодаря использованию микропроцессорных терминалов защиты возможно оперативное диагностирование и выявление повреждений, ведение журнала аварийных событий, учёт и хранение информации о параметрах электрической сети, что позволяет значительно сократить время на проведение ремонтных и профилактических мероприятий, а также повысить оперативность и эффективность диспетчерского управления объектом.

Кроме того, правильно подобранная и качественно реализованная система релейной защиты и автоматики снижает риски выхода из строя дорогостоящего силового оборудования подстанции, такого как трансформаторы ТРДН-25000/110 с расщеплённой обмоткой, высоковольтные выключатели, трансформаторы тока и напряжения, кабельные и воздушные линии электропередачи.

Таким образом, необходимость выбора высоконадёжной, современной системы «релейной защиты и автоматики для подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» полностью обоснована требованиями к повышению оперативности, селективности, надёжности и экономичности функционирования энергосистемы, а также необходимостью выполнения требований нормативных документов и стандартов безопасности.

Ранее на проектируемой подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» было выбрано следующее основное оборудование, для которого необходимо обеспечить надёжную защиту:

- два силовых трансформатора марки ТРДН-25000/110;
- линии электропередачи: питающая двухцепная линия напряжением 110 кВ» [1], отходящие кабельные линии к потребителям напряжением 10 кВ.

С целью обеспечения защиты перечисленного основного оборудования подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» от ненормальных режимов, в «работе выбраны современные устройства релейной защиты и автоматики серии SEPAM 1000+ серии 20 следующих модификаций» [17]:

- для защиты силовых трансформаторов 110/10/10 кВ – устройство Sepam1000+T20;
- для защиты питающих линий 110 кВ и отходящих линий 10 кВ – устройство Sepam1000+S20.

Внешний вид выбранных современных устройств релейной защиты и автоматики серии SEPAM 1000+ серии 20 представлены на рисунке 8.



Рисунок 8 – Внешний вид устройств релейной защиты и автоматики серии SEPAM 1000+ серии 20

Проводится аргументированный выбор данных устройств.

Известно, что применение современных микропроцессорных комплексов РЗА является наиболее целесообразным решением для повышения общей эффективности работы подстанции и энергосистемы в целом.

Для защиты двух силовых трансформаторов 110/10/10 кВ марки ТРДН-25000/110 выбраны устройства Sepam1000+T20. Данные устройства обеспечивают комплексную дифференциальную защиту, «защиту от коротких замыканий, перегрузок и замыканий на землю, а также встроенные функции контроля и мониторинга состояния трансформатора.

Устройства Sepam1000+T20 отличаются высокой чувствительностью и быстродействием, что обеспечивает своевременное отключение трансформаторов в случае возникновения аварийных режимов» [1], минимизируя риск повреждения дорогостоящего оборудования и предупреждая развитие крупных аварийных ситуаций.

Применение устройств Sepam1000+T20 позволяет реализовать эффективную защиту трансформаторов, одновременно обеспечивая возможность удалённого мониторинга состояния оборудования с помощью цифровых каналов передачи данных.

Для защиты питающих линий 110 кВ и отходящих линий 10 кВ подстанции применены микропроцессорные терминалы Sepam1000+S20.

Данные устройства обеспечивают полный набор функций защиты и автоматики линий электропередачи, включая токовые отсечки, максимально-токовую защиту, защиту от замыканий на землю, автоматическое повторное включение (АПВ), а также функции локализации и определения места повреждения.

Устройства Sepam1000+S20 обладают высокой точностью измерений электрических параметров и позволяют интегрировать релейную защиту линий в единую систему диспетчерского управления подстанцией.

Благодаря широким коммуникационным возможностям, терминалы Sepam1000+S20 могут обмениваться информацией с верхними уровнями управления, обеспечивая оперативность реагирования персонала на аварийные ситуации и повышая общую эффективность эксплуатации подстанции.

Внедрение указанных устройств Sepam1000+T20 и Sepam1000+S20 позволяет решить комплекс задач по обеспечению надёжности и безопасности системы электроснабжения подстанции «Самашки».

Высокая чувствительность и быстродействие данных микропроцессорных терминалов существенно сокращают время реакции на

возникновение ненормальных режимов работы оборудования и электрических сетей.

Кроме того, применение устройств серии SEPAM 1000+ серии 20 позволяет значительно снизить эксплуатационные затраты за счёт минимизации трудозатрат на техническое обслуживание и повышение уровня автоматизации процессов управления и диагностики состояния оборудования.

Выводы по разделу.

Для обеспечения надёжной защиты и управления оборудованием понизительной подстанции 110/10/10 кВ «Самашки», выбраны современные микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики серии SEPAM 1000+ серии 20 компании Schneider Electric:

- для защиты силовых трансформаторов 110/10/10 кВ – устройство Sepam1000+T20;
- для защиты питающих линий 110 кВ и отходящих линий 10 кВ – устройство Sepam1000+S20.

Выбранные устройства характеризуются современными требованиями к автоматизации и диспетчеризации энергетических объектов Российской Федерации.

Заключение

В работе разработан, предложен и обоснован комплекс мероприятий по проектированию электрической части понизительной подстанции энергосистемы 110/10/10 кВ «Самашки», обеспечивающей качественное и надёжное электроснабжение потребителей второй категории надёжности с помощью рациональных схемных решений, а также силовых трансформаторов с расщеплённой обмоткой марки ТРДН-25000/110.

Согласно техническим данным энергосистемы, питание проектируемой подстанции осуществляется двумя линиями от энергосистемы на напряжении 110 кВ.

Питающая сеть 110 кВ, к которой будет подключена подстанция, образует единый комплекс высоковольтных линий, связывающих региональные и межрегиональные центры нагрузок рассматриваемого в работе региона.

Исходные данные к выполнению работы, следующие:

- на подстанции применяются силовые трансформаторы с расщеплённой обмоткой низшего напряжения марки ТРДН-25000/110;
- электрическая схема подстанции – концевая (тупиковая);
- от подстанции получают питание электроприемники 2 категории надёжности.

Согласно исходным данным на проектирование, рассматриваемая подстанция питает промышленные, бытовые и коммунальные потребители региона.

Установлено, что суммарная нагрузка проектируемой подстанции равна 40000 кВА.

Основываясь на исходных данных на выполнение работы, которые предусматривают установку на подстанции силовых трансформаторов с расщеплённой обмоткой низшего напряжения марки ТРДН-25000/110, а также

учитывая то, что подстанция по месту расположения в энергосистеме – концевая (тупиковая) и от неё получают питание электроприемники 2 категории надёжности, в работе приняты следующие основные схемные решения:

- число силовых трансформаторов указанной марки принимается равным двум единицам;
- питание подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» осуществляется от двух независимых источников воздушными линиями напряжением 110 кВ;
- РУ-110 кВ подстанции выполняется открытым (ОРУ-110 кВ) с применением схемы 110-4Н «Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линии»;
- РУ-10 кВ предназначено для приема электроэнергии пониженного напряжения от силовых трансформаторов подстанции, с последующим распределением электроэнергии среди потребителей на уровне напряжения 10 кВ. В этом устройстве, выполненном в виде закрытого распределительного устройства (ЗРУ), использует комплектные ячейки внутренней установки типа КРУ и применяются схема «Две секционированные системы сборных шин» с распределением по 4 линии потребителей на каждую систему сборных шин.

Получены расчёты электрических нагрузок на подстанции 110/10/10 кВ «Самашки»:

- отдельных присоединений потребителей;
- секций сборных шин 10 кВ;
- силовых трансформаторов;
- всей подстанции.

В результате проведения анализа установлено, что выбранные к установке на подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» работе силовые трансформаторы с расщеплённой обмоткой марки ТРДН-25 МВА полностью

удовлетворяют всем предъявляемым нормативным требованиям как по допустимой нагрузке в обычных режимах эксплуатации, так и по способности кратковременного выдерживания перегрузок в послеаварийных режимах.

Таким образом, принятые в работе силовые трансформаторы не только обеспечивают необходимый запас по мощности, но и способствуют повышению эксплуатационной надёжности подстанции и улучшению качества электроснабжения региона, отвечая современным техническим требованиям и стандартам, а также создавая значительные предпосылки для дальнейшего развития энергетической системы.

На стороне 110 кВ подстанции 110/10/10 кВ «Самашки», выбрано и проверено следующее современное оборудование открытой установки:

- современные элегазовые выключатели марки ВЭБ-110П-40/2500 УХЛ1;
- современные разъединители РН-СЭЩ-110/1000 УХЛ1;
- трансформаторы напряжения марки ЗНОГ-110/УХЛ1
- ограничители перенапряжения марки ОПНп-110/800/146-10-III-УХЛ1
- встроенные в выключатели трансформаторы тока марки ТВТ-110-I.

На питающей линии напряжением 110 кВ подстанции 110/10/10 кВ «Самашки», обусловлено применение сечения проводника марки АС-120/19 с $I_{don} = 390$ А.

На основании проведённых расчётов установлено, что все выбранные аппараты и проводники на стороне 110 кВ подстанции «Самашки» обеспечивают выполнение нормативных требований по надёжности, безопасности, энергоэффективности, а также обладают достаточным запасом по термической и электродинамической стойкости при расчётных токах короткого замыкания.

Применение данных решений позволит существенно повысить уровень технического состояния системы электроснабжения объекта, обеспечить стабильность энергоснабжения потребителей второй категории надёжности и

снизить эксплуатационные затраты на обслуживание оборудования в долгосрочной перспективе.

Для компоновки КРУ с выбранными ячейками марки К-204ЭП на стороне 10 кВ подстанции 110/10/10 кВ «Самашки», выбрано и проверено следующее современное оборудование:

- современные вакуумные выключатели марки ВВ-СВЭЛ-10/2500-У2;
- современные разработки трансформаторов тока марки ТОЛ-СЭЩ-10-21;
- современные разработки трансформаторов напряжения марки ЗНОЛ-СЭЩ-10;
- современные ограничители перенапряжения марки ОПН-П-10/12,7/10/1,1.

Для канализации электроэнергии на стороне 10 кВ подстанции 110/10/10 кВ «Самашки», с целью качественного питания потребителей, на всех отходящих линиях выбраны по два силовых кабеля марки АСБ-10 (3×120).

В результате проведённого выбора и анализа электрических аппаратов и комплектующих для РУ-10 кВ подстанции «Самашки» установлено, что предложенные решения соответствуют современным нормативным требованиям, обеспечивают необходимые показатели надёжности и безопасности, способствуют повышению энергоэффективности эксплуатации объекта и являются оптимальными с точки зрения технических и экономических характеристик.

В результате проведения расчётов установлено, что ТСН марки ТСЛ-63/10 отвечают всем условиям выбора и проверок на нагрузочную способность. Таким образом, окончательно приняты к установке два ТСН указанной марки.

Кроме того, показано, что данные трансформаторы отличаются повышенной надёжностью, безопасностью и удобством технического обслуживания, так как выполнены по специальной технологии в герметичном исполнении без применения расширительного бака и имеют высокий КПД.

В качестве РУ-0,4 кВ системы СН выбрано комплектное низковольтное распределительное устройство с секционированием и АВР, выполненное в виде комплектных распределительных шкафов серии ЩО-70.

На основании проведённых расчётов установлено, что оптимальным решением для обеспечения нормативного сопротивления контура заземления на подстанции 110/10/10 кВ «Самашки» является применение 64 вертикальных электродов.

Указанное количество электродов, соединённых в форме замкнутой сетки без разрывов цепи, позволяет добиться необходимого уровня электробезопасности, гарантируя безопасные условия эксплуатации оборудования и защиту персонала подстанции.

Для обеспечения надёжной защиты и управления оборудованием понизительной подстанции 110/10/10 кВ «Самашки», выбраны современные микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики серии SEPAM 1000+ серии 20 компании Schneider Electric:

- для защиты силовых трансформаторов 110/10/10 кВ – устройство Sepam1000+T20;
- для защиты питающих линий 110 кВ и отходящих линий 10 кВ – устройство Sepam1000+S20.

Таким образом, внедрение полученных в работе результатов позволит создать рациональную и надёжную электрическую схему подстанции 110/10/10 кВ «Самашки».

Список используемых источников

1. Агафонов А.И., Бростилова Т. Ю., Джазовский Н. Б. Современная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем: учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Инфра-Инженерия, 2020. 300 с.
2. ВЛ 110 кВ «Самашки» [Электронный ресурс]: URL: <https://www.openstreetmap.org/way/400650215> (дата обращения: 17.03.2025).
3. 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: 17.03.2025).
4. Допустимые длительные токовые нагрузки на неизолированные провода. [Электронный ресурс]: URL: <https://electro.narod.ru/tables/4.1.9.htm> (дата обращения: 17.03.2025).
5. Кабель АСБ допустимый ток. [Электронный ресурс]: URL: <https://elmarts.ru/blog/spravochnik/asb-dlitelno-dopustimyy-tok/> (дата обращения: 17.03.2025).
6. Киреева Э.В. Электроснабжение и электрооборудование организаций и учреждений. М.: КноРус, 2019. 236 с.
7. Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов. М.: Академия, 2021. 400 с.
8. Линия: Самашки (400650215) [Электронный ресурс]: URL: <https://www.openstreetmap.org/way/400650215#map=17/43.300204/45.305971> (дата обращения: 17.03.2025).
9. Лыкин А.В. Электрические системы и сети: учебник. Москва: Издательство Юрайт, 2023. 362 с.
10. Немировский А.Е. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций. М.: Инфра-Инженерия, 2020. 174 с.
11. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок (Приказ от 15 декабря 2020 г. № 903н / Приказ от 29 апреля 2022 г. № 279н).

Изд-во Мини-Тайп, 2023. 216 с.

12. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. Изд-во ДЕАН, 2022. 192 с.

13. Правила устройства электроустановок. 7-е издание. Изд-во ЦентрМаг, 2022. 584 с.

14. РД 153-34.0-20.527-98 «Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования» [Электронный ресурс]: URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294817/4294817179.htm> (дата обращения: 17.03.2025).

15. Сибикин Ю.Д. Пособие к курсовому и дипломному проектированию электроснабжения промышленных, сельскохозяйственных и городских объектов. Учебное пособие. М.: Форум, 2021. 383 с.

16. Схема ЛЭП и электроснабжения России ПС Самашки. [Электронный ресурс]: URL: <https://frexosm.ru/power/#11/43.3/45.306> (дата обращения: 17.03.2025).

17. Устройства SEPAM 20, SEPAM 1000+ серии 20 [Электронный ресурс]: URL: <http://www.schneider-spb.ru/sepam-1000-20.html> (дата обращения: 17.03.2025).

18. Устройство молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций [Электронный ресурс]: URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294815/4294815349.pdf> (дата обращения: 17.03.2025).

19. Энергетическая стратегия РФ на период до 2035 года. Распоряжение Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р. Москва, 2020. 142 с.

20. Ячейка К-204ЭП. [Электронный ресурс]: URL: <https://belgorod.energo-prom-ktp.ru/catalog/kru/k-204ep/> (дата обращения: 17.03.2025).