

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 Реконструкция электрической части подстанции 220/110/10 кВ «Чертаново»

Обучающийся

М.Е. Делидов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

О.В. Федяй

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

Консультант

к.п.н., доцент, О.Н. Брега

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

Тольятти 2023

## Аннотация

В работе, в связи со значительным увеличением нагрузки потребителей подстанции 220/110/10 кВ «Чертаново», проведена замена двух старых автотрансформаторов мощностью 32 МВА каждый, на два новых автотрансформатора мощностью по 63 МВА каждый. Таким образом, суммарная мощность подстанции «Чертаново» увеличится с 64 МВА до 126 МВА.

Также произведена модернизация основного оборудования распределительных устройств ОРУ-220 кВ и ОРУ-110 кВ подстанции. Модернизация заключается в замене некоторых морально и технически устаревших электрических аппаратов на современные марки и модели, обладающие высокими критериями надёжности, экономичности, экологичности, быстродействия, селективности (избирательности), электробезопасности и прочими аналогичными показателями.

После анализа оборудования подстанции, установлено, что там находятся устаревшие выключатели (масляные баковые) У-220-2000-25У1 (в ОРУ-220 кВ) и МКП-110Б-1000/630-20У1 (ОРУ-110 кВ). Вместе с заменой автотрансформаторов, их предложено заменить на новые современные модификации высоковольтных выключателей, выбрав и проверив в работе на термическую и электродинамическую устойчивость к токам короткого замыкания.

Кроме того, для усовершенствования схемы электрических соединений с целью повышения надёжности питания потребителей, предложена установка второй перемычки в схеме ОРУ-220 кВ подстанции, состоящей из высоковольтного секционного выключателя и двух разъединителей.

Результатом работы является разработка, проверка и реализация технических решений, позволяющих внедрить качественные мероприятия по модернизации автотрансформаторов и электрооборудования на объекте исследования, с параллельной реконструкцией схемы электрических соединений ОРУ-220 данной подстанции.

## **Abstract**

In connection with a significant increase in the load of consumers of the substation 220/110/10 kV «Chertanovo», two old autotransformers with a capacity of 32 MVA each were replaced with two new autotransformers with a capacity of 63 MVA each. Thus, the total capacity of the Chertanovo substation will increase from 64 MVA to 126 MVA.

Also, the main equipment of the switchgears of the open switchgear-220 kV and open switchgear-110 kV of the substation was upgraded. Modernization consists in replacing some morally and technically obsolete electrical devices with modern brands and models that have high criteria for reliability, economy, environmental friendliness, speed, selectivity, electrical safety and other similar indicators.

After analyzing the equipment of the substation, it was found that there are outdated switches. Along with the replacement of autotransformers, it is proposed to replace them with new modern modifications of high-voltage circuit breakers, having selected and tested in operation for thermal and electrodynamic resistance to short-circuit currents.

In addition, in order to improve the electrical connection scheme in order to increase the reliability of consumer power supply, it is proposed to install a second jumper, consisting of a high-voltage sectional switch and two disconnectors, in the substation outdoor switchgear-220 kV.

The result of the work is the development, verification and implementation of technical solutions that allow the introduction of high-quality measures for the modernization of autotransformers and electrical equipment at the object of study, with a parallel reconstruction of the electrical connection diagram 220 of this substation.

## Содержание

Введение.....	5
1 Анализ исходных данных по электроснабжению подстанции .....	8
1.1 Исходная характеристика ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы ....	8
1.2 Обоснование реконструкции подстанции .....	15
2 Техническая реализация мероприятий по реконструкции подстанции .....	20
2.1 Расчёт электрических нагрузок подстанции .....	20
2.2 Выбор и проверка новых силовых автотрансформаторов.....	25
2.3 Расчёт токов короткого замыкания .....	29
2.4 Выбор и расчёт электрических проводников.....	40
2.5 Выбор основного оборудования и его проверка.....	45
3 Выбор устройств релейной защиты и автоматики .....	52
4 Расчёт молниезащиты и заземления подстанции .....	61
4.1 Расчёт заземления подстанции .....	61
4.2 Расчёт молниезащиты подстанции.....	65
Заключение .....	69
Список используемых источников.....	72

## Введение

Развитие энергетической системы стран является одним из основных критериев экономического и технического развития потенциала. С развитием промышленности увеличиваются потребляемые мощности, растут нагрузки потребителей, что сказывается на генерации, передаче и потреблении электрической энергии. Такая связь является важнейшей составляющей современного научно-технического прогресса. Известно, что система электроснабжения Российской Федерации сегодня носит централизованный характер. Такая система хороша тем, что обеспечивает значительный резерв мощности и бесперебойное питание потребителей от многих источников энергосистемы. Определённо, что в традиционной энергетике электроэнергия вырабатывается турбогенераторами на атомных и тепловых электростанциях, а также гидрогенераторами на гидроэлектростанциях.

Для передачи электроэнергии на большие расстояния, с учётом весьма значительных мощностей и потерь электроэнергии, на выходе из электростанций находятся повышающие автотрансформаторы, после которых посредством линий электропередач высокого и сверхвысокого напряжения, согласно традиционной схеме, получает питание сеть понижающих питающих подстанций (1150-220 кВ), которые, в свою очередь, далее питают потребительские подстанции на номинальном напряжении 110-0,4 кВ.

Очевидно, что основными составляющими современных понижающих трансформаторных подстанций является совокупность силовых автотрансформаторов и распределительных устройств. Именно благодаря их слаженной работе обеспечиваются условия надёжности, электробезопасности, быстродействия и селективности (избирательности).

Фактически, такими показателями обладают современные разработки электрических аппаратов, активно внедряющихся в последнее время для применения в распределительных устройствах трансформаторных подстанций энергосистемы всех типов и классов напряжения.

Таким образом, установлено, что применение современных электрических аппаратов в распределительных устройствах трансформаторных подстанций энергосистемы всех типов создаёт необходимые условия для обеспечения нормальной и надёжной работоспособности не только самой подстанции, но и всей электрической сети и, как результат, - всей энергосистемы в целом. Поэтому реконструкция схем электрических соединений и модернизация оборудования современных трансформаторных подстанций и электростанций энергосистемы всех типов является актуальным заданием современной электроэнергетики и данной работы.

Основной целью работы является разработка рекомендаций по модернизации понизительной подстанции 220/110/10 кВ «Чертаново» Московской области. Такая модернизация обусловлена значительным увеличением нагрузки потребителей подстанции 220/110/10 кВ «Чертаново». В связи с этим, проведена замена двух старых автотрансформаторов мощностью 32 МВА каждый, на два новых автотрансформатора мощностью по 63 МВА каждый. Таким образом, суммарная мощность подстанции «Чертаново» увеличиться с 64 МВА до 126 МВА.

Объектом исследования в работе является понизительная трансформаторная подстанция переменного тока ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы. Предметом исследования в работе являются автотрансформаторы подстанции, а также основное электрооборудование распределительных устройств схемы главных электрических соединений ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы.

Кроме того, для усовершенствования схемы электрических соединений с целью повышения надёжности питания потребителей, предложена установка второй перемычки в схеме ОРУ-220 кВ подстанции, состоящей из высоковольтного секционного выключателя и двух разъединителей.

Также в работе произведена модернизация основного оборудования распределительных устройств ОРУ-220 кВ и ОРУ-110 кВ подстанции.

Модернизация заключается в замене некоторых морально и технически устаревших электрических аппаратов на современные марки и модели, обладающие высокими критериями надёжности, экономичности, экологичности, быстродействия, селективности (избирательности), электробезопасности и прочими аналогичными показателями. После анализа оборудования подстанции, установлено, что там находятся устаревшие выключатели (масляные баковые) У-220-2000-25У1 (в ОРУ-220 кВ) и МКП-110Б-1000/630-20У1 (ОРУ-110 кВ), а также устаревшие разъединители. Вместе с заменой автотрансформаторов, их предложено заменить на новые современные модификации высоковольтных выключателей и разъединителей, выбрав и проверив в работе на термическую и электродинамическую устойчивость к токам короткого замыкания, рассчитанными в работе. Такая модернизация является частичной и осуществляется без внесения изменений в существующую схему электрических соединений подстанции.

Для достижения основной цели и решения поставленных задач, в работе используются следующие методы и подходы: методы анализа нормативной литературы, методы анализа экспериментальных данных, аналитический метод, методы аналогии, методы и подходы для расчёта электрических цепей, методы упрощения электрических сетей (с допущениями и интервалами), методы замещения электрических сетей и элементов электрических цепей, методы исследования и расчёта надёжности, экономические методы и подходы в электроэнергетике, методы планирования эксперимента.

Также в работе, в связи с изменением номинальной мощности автотрансформаторов в результате модернизации, выбраны и проверены новые проводники питающих линий 220 кВ, а также распределительных линий подстанции. Результатом работы является разработка, проверка и реализация технических решений, позволяющих внедрить качественные мероприятия по модернизации автотрансформаторов и электрооборудования на объекте исследования, с параллельной реконструкцией схемы электрических соединений ОРУ-220 данной подстанции.

## **1 Анализ исходных данных по электроснабжению подстанции**

### **1.1 Исходная характеристика ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы**

Далее в работе приводится исходная характеристика схемы электрических соединений нормального режима и основного оборудования распределительных устройств подстанции ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы.

Рассматриваемая в работе ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы является одной из потребительских подстанций региональных электрических сетей.

По месту расположения в энергосистеме, ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы является узловой подстанцией регионального значения, получающей питание от двух независимых источников электроэнергии, так как от неё питаются потребители 1 и 2 категорий надёжности, следовательно, на данном объекте в силу приведённых обстоятельств требуется обеспечить надёжность схемных решений [7]. Это отражено в схемах электрических соединений её распределительных устройств.

Конструктивный тип подстанции: открытый. Вид обслуживания: постоянный дежурный персонал. Район климатических условий: по ветру – 45м/с, по гололеду – 30мм. Связь на подстанции – высокочастотная проводная, а также спутниковая и телефонная.

Питание ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» осуществляется от двух независимых источников питания:

- ввод 1 – диспетчерское наименование «Д2» (применяется ВЛ-220 кВ с проводом АСК-240);
- ввод 2 – диспетчерское наименование «Д4» (применяется ВЛ-220 кВ с проводом АСК-240).



Таким образом, в схеме внешнего электроснабжения рассматриваемой в работе ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, обеспечен необходимый и достаточный уровень резервирования внешней системы электроснабжения, достаточный для питания потребителей 1 и 2 категорий надёжности согласно требованиям [10]. Далее рассматривается структурная схема ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» с последующей характеристикой её основных составляющих и схем электрических соединений. На объекте проектирования (ТП-220/110/10 кВ «Чертаново») находятся следующие основные конструктивные составляющие, описание которых представлено ниже (рисунок 1).

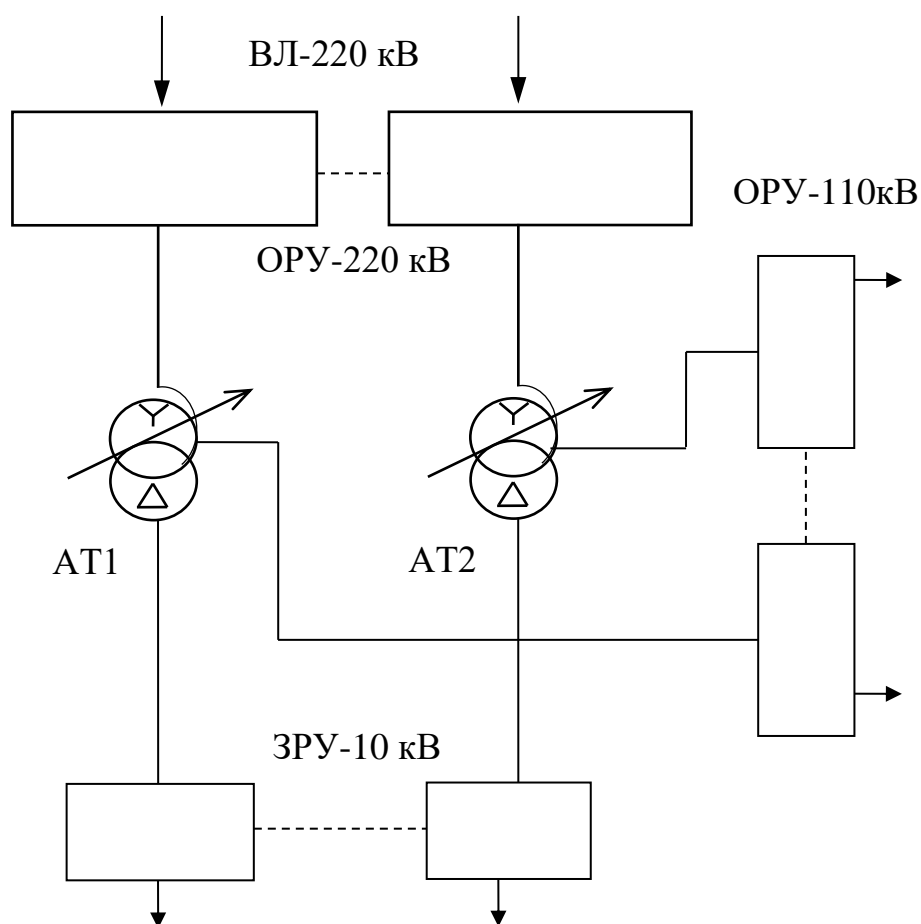


Рисунок 1 – Структурная схема ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы

Таким образом, в структурной схеме ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, можно выделить такие основные составляющие:

- распределительные устройства – три единицы (по числу номинальных напряжений и обмоток автотрансформаторов): 220 кВ, 110 кВ, 10 кВ;

- силовые автотрансформаторы (две единицы марки АТДТНГ-32000/220);
- потребители (на напряжении 110 кВ – две отходящие линии, на напряжении 10 кВ – девять отходящих линий).

Первым основным конструктивным элементом ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы является распределительное устройство высшего напряжения (ОРУ 220 кВ). Оно необходимо для приёма и распределения электроэнергии на силовые автотрансформаторы подстанции с защитой и коммутацией электрической сети 220 кВ данной подстанции.

В результате проведения анализа установлено, что в исходной схеме соединений нормального режима ОРУ 220 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы применяется схема «5Н – схема мостика с применением автоматической перемычки».

Такая схема гораздо надёжная, обеспечивая все необходимые условия и требования нормативных документов. Она применяется для ремонта одной из рабочих секций сборных шин, без отключения потребителей.

Также такая схема сборных шин ОРУ 220 кВ используется при транзите мощности, позволяя контролировать и распределять электроэнергию по требуемым направлениям (в случае необходимости). Однако, по причине отсутствия транзита, на данный момент вторая перемычка в ОРУ-220 кВ, в которой находятся секционный выключатель и два разъединителя, разобрана и демонтирована.

В исходной схеме электрических соединений ОРУ 220 кВ на ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, установлено следующее основное силовое оборудование, показанное на графическом листе 1.

Так как ОРУ 220 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы является объектом модернизации в работе, следовательно, всё оборудование необходимо рассмотреть детально. Перечень и техническая характеристика высоковольтных выключателей, установленных в ОРУ 220 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Перечень и техническая характеристика высоковольтных выключателей, установленных в ОРУ 220 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы

Диспетчерское наименование выключателя	СОВМ-110	ВМ-С42	ВМ-С41
Тип (марка) выключателя	У-220-2000-25У1	У-220-2000-25У1	У-220-2000-25У1
Год ввода в эксплуатацию	1984	1984	1984
Организация-изготовитель	Московский завод высоковольтной аппаратуры	Московский завод высоковольтной аппаратуры	Московский завод высоковольтной аппаратуры

Перечень и техническая характеристика разъединителей, установленных в ОРУ 220 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Перечень и техническая характеристика разъединителей, установленных в ОРУ 220 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы

Диспетчерское наименование разъединителя	Тип разъединителя	Год ввода в эксплуатацию	Организация-изготовитель
ТР-АТ1-220	РНДЗ-220/1000	1976	ЭМЗ, г. Великие Луки
ТР-АТ2-220	РНДЗ-220/1000	1984	ЭМЗ, г. Великие Луки
ШР1-СВМ-220	РНДЗ-220/1000	1984	ЭМЗ, г. Великие Луки
ШР2-СВМ-220	РНДЗ-220/1000	1984	ЭМЗ, г. Великие Луки
ТР-ТН1-220	РНДЗ-220/1000	1976	ЭМЗ, г. Великие Луки
ТР-ТН2-220	РНДЗ-220/1000	1984	ЭМЗ, г. Великие Луки
ШР-Д2	РНДЗ-220/1000	1976	ЭМЗ, г. Великие Луки
ШР-Д4	РНДЗ-220/1000	1976	ЭМЗ, г. Великие Луки
ЛР-Д2	РНДЗ-220/1000	1984	ЭМЗ, г. Великие Луки
ЛР-Д4	РНДЗ-220/1000	1976	ЭМЗ, г. Великие Луки
СР1-220	РНДЗ-220/1000	1976	ЭМЗ, г. Великие Луки
СР2-220	РНДЗ-220/1000	1986	ЭМЗ, г. Великие Луки
РПГ-Д2	РНДЗ-220/1000	1984	ЭМЗ, г. Великие Луки
РПГ-Д4	РНДЗ-220/1000	1976	ЭМЗ, г. Великие Луки

Также в ОРУ 220 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы установлены трансформаторы напряжения марки НКФ-220-58-У1 (две единицы) и встроенные в высоковольтные выключатели трансформаторы тока марки ТВ-220.

Так как выключатели 220 кВ, установленные в ОРУ 220 кВ, выполнены со встроенными трансформаторами тока, необходимости отдельной установки ТТ в схеме электрических соединений ОРУ 220 кВ подстанции, нет [25].

Таким образом, в результате проведения анализа оборудования ОРУ 220 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, было установлено, что со всего основного силового оборудования требует замены масляные баковые выключатели и разъединители, которые устарели, выработали свой технический ресурс. Поэтому они ненадёжны и требуют замены на современные модификации, которые необходимо выбрать и обосновать в работе далее.

Проводится далее краткий анализ остальных основных элементов ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы.

Из силовых автотрансформаторов и автотрансформаторов, на подстанции находятся силовые автотрансформаторы (две единицы марки АДТНГ-32000/220), которые были введены в эксплуатацию на подстанции в 1975 году.

В связи со значительным увеличением нагрузки, в работе их необходимо заменить на трансформаторы большей номинальной мощности (63 МВА). В связи с этим, новые трансформаторы необходимо проверить по условиям допустимых аварийных перегрузок [16].

В ОРУ 110 кВ применяется схема № 12 «Две рабочих систем сборных шин, секционируемых выключателем, с применением обходной системы сборных шин».

Такая схема надёжная, обеспечивая все необходимые условия и требования нормативных документов. Обходная система сборных шин в ОРУ 110 кВ применяется для ремонта одной из рабочих секций сборных шин, без отключения потребителей.

Перечень и техническая характеристика высоковольтных выключателей, установленных в ОРУ 110 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, представлено в таблице 3.

Таблица 3 – Перечень и техническая характеристика высоковольтных выключателей, установленных в ОРУ 110 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы

Диспетчерское наименование выключателя	СОВМ-110	ВМ-С42	ВМ-С41
Тип (марка) выключателя	МКП-110Б-1000/630-20У1	МКП-110Б-1000/630-20У1	МКП-110Б-1000/630-20У1
Год ввода в эксплуатацию	1984	1984	1984
Организация-изготовитель	Московский завод высоковольтной аппаратуры	Московский завод высоковольтной аппаратуры	Московский завод высоковольтной аппаратуры

Можно сделать вывод, что все высоковольтные выключатели, установленные в ОРУ 110 кВ подстанции, являются устаревшими, изношенными и требуют замены. Перечень и техническая характеристика разъединителей, установленных в ОРУ 110 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Перечень и техническая характеристика разъединителей, установленных в ОРУ 110 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы

Диспетчерское наименование разъединителя	Тип разъединителя	Год ввода в эксплуатацию	Организация-изготовитель
ТР-АТ1-110	РЛН(З)-110/630	1986	ЭМЗ, г. Великие Луки
ТР-АТ2-110	РЛН(З)-110/630	1986	ЭМЗ, г. Великие Луки
ШР-АТ1-110	РЛН(З)-110/630	1986	ЭМЗ, г. Великие Луки
ШР-АТ2-110	РЛН(З)-110/630	1986	ЭМЗ, г. Великие Луки
ШР1-СОВМ-110	РЛН(З)-110/630	1986	ЭМЗ, г. Великие Луки
ШР2-СОВМ-110	РЛН(З)-110/630	1986	ЭМЗ, г. Великие Луки
ШР3-СОВМ-110	РЛН(З)-110/630	1986	ЭМЗ, г. Великие Луки
РПГ-110	РЛН(З)-110/630	1986	ЭМЗ, г. Великие Луки

Таким образом, установлено, что и разъединители, установленные в ОРУ 110 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, также нуждаются в замене по причине устаревания конструкции и технического износа.

Следующим основным элементом ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы является распределительное устройство низшего напряжения РУ-10 кВ (РУ НН). В исходной схеме РУ-10 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы применяется схема «Одна рабочая секционированная выключателем

система шин» [7] с установленным секционным выключателем высокого напряжения между секциями сборных шин (в нормальном режиме работы отключён).

При этом, с целью создания требуемого резерва в системе, в РУ-10 кВ применяется раздельная работа двух рабочих секций сборных шин: часть потребителей подключена и питается от одной секции сборных шин (блок «линия – трансформатор Т1»), часть – от второй (блок «линия – трансформатор Т2»).

Секционный выключатель напряжением 10 кВ в схеме нормального режима работы отключён, обеспечивая раздельный режим работы всей системы РУ-10 кВ.

В РУ-10 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, установлено следующее основное силовое оборудование в виде выключателей марки ВР-10-20/630(1600) У1 – всего в схеме предусмотрено два вводных выключателя (в нормальном режиме оперативной схемы включены), один секционный выключатель (в нормальном режиме оперативной схемы отключён), а также линейные выключатели по числу отходящих линий.

Так как РУ-10 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы конструктивно выполнено в виде закрытого распределительного устройства с применением комплектных ячеек (далее КРУ), то разъединители в его схеме не устанавливаются, так как они заменены на втычные контакты ячеек.

Кроме основного силового оборудования, в РУ-10 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, также установлено следующее современное оборудование для питания вторичных цепей и защиты от атмосферных перенапряжений, также не нуждающееся в модернизации и замене оборудования:

- измерительные автотрансформаторы тока марки ТЛО-10-2 У1;
- измерительные трансформатор напряжения марки НАМИТ-10;
- ограничители перенапряжения марки ОПН-Р/TEL-10/11,5;
- предохранители для защиты ТН марки ПКТ-101-10-У3.

Исходная схема электрических соединений ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы до проведения модернизации оборудования, с указанием марок данного оборудования, приведена на графическом листе 1.

На основании приведённой исходной технической информации и характеристики основного оборудования подстанции, далее в работе проводится решение основных задач.

## **1.2 Обоснование реконструкции подстанции**

Обоснование технических решений по реконструкции ОРУ 220 кВ проводится на основе требований к схемам трансформаторных подстанций. Для разработки качественного проекта реконструкции подстанции с учётом модернизации оборудования распределительных устройств на ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, необходимо провести краткий аналитический обзор основных требований, предъявляемых к трансформаторным подстанциям систем электроснабжения нормативными положениями документов. Известно, что основные нормы и требования, которые предъявляются к схемам и оборудованию трансформаторных подстанций энергосистем, заключаются в неукоснительном соблюдении следующих требований [3,7,11]:

- условия надёжности и бесперебойности питания потребителей соответствующих категорий;
- нормы электробезопасности при выполнении электромонтажных, ремонтных работ и работ по обслуживанию и осмотру всего оборудования подстанций;
- применение резервирования на всех ответственных участках распределительной, питающей сети и потребителей подстанции, отказ от системы «холодного» резерва (оборудование не находится в работе в нормальной схеме подстанции);
- применение секционирования на всех звеньях электрической сети в

- распределительных устройствах подстанции (как правило, применяется секционирование систем сборных шин распределительных устройств);
- применение стандартных разработанных схем распределительных устройств и подстанций, в которые изменения должны быть обоснованы только расчётным технико-экономическим путём;
  - обеспечения коммутационной способности оборудования распределительных устройств подстанции (путём установки коммутационной аппаратуры в распределительных устройствах ПС);
  - автоматизация силового, контрольного, измерительного оборудования путём внедрения средств и устройств автоматики в схемы нормальных режимов подстанций;
  - применение современных средств автоматизации на всех уровнях и звеньях подстанций: телеизмерений, автоматизированных систем учёта и контроля электроэнергии, автоматизированных систем управления режимами, электроснабжением подстанций.

Как было указано ранее, основным направлением исследований в работе, является замена автотрансформаторов АТДТНГ-32000/220 на понизительной подстанции ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы. В виду того, что к данной подстанции подключаются новые потребители, предполагается установить вместо указанных автотрансформаторов, автотрансформаторы большей номинальной мощности марки АТДЦТН-63000/220 (завод-изготовитель – ООО «Сименс Энерджи Трансформаторы»).

Таким образом, суммарная мощность понизительной подстанции ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы возрастёт с 64 МВА до 126 МВА.

Кроме того, в схеме ОРУ-220 кВ подстанции, в связи с увеличением нагрузки и заменой силовых трансформаторов, предлагается восстановить вторую ремонтную автоматическую перемычку в виде технического блока «разъединитель-выключатель-разъединитель», которая была демонтирована на подстанции ранее в связи с отсутствием перетоков мощности в схеме и её



неиспользованием. Таким образом, в результате реконструкции данного участка схемы электрических соединений ОРУ-220 кВ, значительно возрастёт пропускная способность транзитных линий подстанции, а также увеличится надёжность схемы в целом. Этот аспект актуален в связи с вводом новых трансформаторов на подстанции и увеличением пропускной плановой и аварийной нагрузки схемы электрических соединений.

В данной работе, после проведения анализа, также предложены рекомендации по модернизации электрической части понизительной подстанции ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, включающие в себя следующие основные мероприятия по замене некоторого силового оборудования на объекте исследования.

В результате проведения анализа было установлено, что в силовой части РУ-220 кВ и РУ-110 кВ ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, находятся некоторые морально и технически устаревшие и выработавшие свой ресурс электрические аппараты, которые необходимо заменить на новые современные аппараты соответствующих марок.

При этом модернизация оборудования проводится без изменений в схеме электрических соединений объекта, что значительно упрощает задачу и ускоряет данный технологический процесс.

Перечисленное оборудование предлагается в работе заменить их на новые, современные модификации, отличающиеся повышенными критериями надёжности, экономичности, безопасности, а также быстродействием и селективностью. Данный вопрос требует срочного решения, так как в системе электроснабжения РУ-110 кВ и РУ-10 кВ ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» в последние годы участились аварии, вызванные потерей надёжности в связи с износом силового оборудования. Следовательно, решение данного вопроса в работе носит актуальный характер.

Сводный анализ данных по замене оборудования распределительных устройств в ОРУ-220 кВ и ОРУ-110 кВ на рассматриваемой подстанции ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы представлен в таблице 5.

Таблица 5 – Сводный анализ данных по замене оборудования распределительных устройств в ОРУ-220 кВ и ОРУ-110 кВ на ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы

Место установки оборудования	Наименование оборудования	Причина замены оборудования	Примечание
ОРУ-220 кВ	Масляные баковые выключатели У-220-2000-25У1	Устаревшее, изношенное оборудование	Замена на современный тип выключателей
ОРУ-220 кВ	Разъединители РНДЗ-220/1000	Устаревшее, изношенное оборудование	Замена на современный тип разъединителей
ОРУ-110 кВ	Масляные баковые выключатели МКП-110Б-1000/630-20У1	Устаревшее, изношенное оборудование	Замена на современный тип выключателей
ОРУ-110 кВ	Разъединители РЛН(З)-110/630	Устаревшее, изношенное оборудование	Замена на современный тип разъединителей

Так как оборудование РУ-10 кВ ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» современное и отвечает всем требованиям по надёжности и экономичности, следовательно, его модернизация в работе не проводится. Внедрение этих мероприятий будет иметь значительный технико-экономический эффект, так как позволит предотвратить возникновение аварий в электрической части ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, а в случае возникновения – быстро их локализовать, значительно снизить денежные затраты на монтаж, обслуживание и ремонт нового оборудования, так как практически на все новейшие модификации завод-изготовитель даёт расширенную гарантию. В итоге значительно снизится перерыв в электроснабжении потребителей подстанции, что также принесёт эффект как технический, так и экономический. Предложенная модернизация обеспечит значительно более высокий уровень надёжности с применением условий резервирования и секционирования, что положительно скажется на бесперебойном электроснабжении потребителей объекта исследования.

Выводы по разделу 1.

В работе приведено описание и анализ исходной схемы электрических соединений ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы.

На основании полученных аналитических данных проведённого анализа, установлено, что в работе рекомендуется внедрить предложенные мероприятия по реконструкции ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, которые осуществляются путём внедрения таких групп мероприятий [24]:

- первая группа – замена силовых автотрансформаторов АДТНГ-32000/220 на понизительной подстанции ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, на автотрансформаторы большей номинальной мощности марки АДЦТН-63000/220 (завод-изготовитель – ООО «Сименс Энерджи Трансформаторы»);
- вторая группа – модернизация оборудования распределительных устройств ОРУ-220 кВ и ОРУ-110 кВ подстанции (выключателей высокого напряжения и разъединителей), путём их замены на современное оборудование соответствующих типов ведущих производителей;
- третья группа – реконструкция схемы главных электрических соединений нормального режима ОРУ-220 кВ подстанции, в связи с увеличением нагрузки и заменой автотрансформаторов, путём восстановления второй ремонтной автоматической перемычки в виде технического блока «разъединитель-выключатель-разъединитель», которая была демонтирована на подстанции ранее в связи с отсутствием перетоков мощности в схеме «5Н» и её неиспользованием.

Таким образом, установлено, что практическая реализация предложенных мероприятий по реконструкции ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы с внедрением приведённых основных групп мероприятий, будет способствовать значительному повышению параметров надёжности, бесперебойности, электробезопасности и экономичности на объекте исследования.

Предложенные мероприятия реализуются в работе далее и подтверждаются расчётным путём.

## **2 Техническая реализация мероприятий по реконструкции подстанции**

### **2.1 Расчёт электрических нагрузок подстанции**

В связи с мероприятиями по реконструкции подстанции, для достижения поставленной цели в работе следует провести расчёт электрических нагрузок, которые далее используются для расчёта максимальных рабочих токов с последующими выбором и проверкой силовых автотрансформаторов, а также проводников линий, основного оборудования электрической части ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы.

При этом, в силу того факта, что нагрузка ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы распределяется на два класса напряжения (110 кВ и 10 кВ), расчёт нагрузок проводится для каждого класса отдельно.

В работе на ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы подлежат расчёту следующие виды нагрузки:

- активная;
- реактивная;
- полная;
- расчётный ток.

С учётом увеличившейся фактической нагрузки ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, что обусловило замену автотрансформаторов на подстанции, установлено, что после реконструкции значение суммарной фактической нагрузки на данном объекте будет составлять 87 МВА.

При этом в сеть 110 кВ распределяется примерно 80% всей нагрузки, таким образом, значение фактической мощности, поступающая в сеть ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, будет примерно составлять  $0,8 \cdot 87 = 69,6$  МВА.

Остальная мощность распределяется в сеть потребителей 10 кВ, она будет составлять  $87 - 69,6 = 17,4$  МВА.

Далее проводится расчёт нагрузок электрической части ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы.

Активная расчётная нагрузка потребителей электрической части ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы [11]:

$$P_{np} = K_3 \cdot P_m, \text{ кВт}, \quad (1)$$

где  $P_m$  – максимальная активная нагрузка напряжением 110 кВ и 10 кВ потребителей электрической части ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, кВт (по данным энергосистемы);

$K_3$  – коэффициент загрузки потребителей электрической части ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, о.е. [6].

Реактивная расчётная нагрузка электрической части ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы [11]:

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

где  $\operatorname{tg} \varphi$  – коэффициент реактивной мощности, соответствующий текущему значению коэффициента активной мощности системы ( $\cos \varphi$ ). С учётом компенсации реактивной мощности до нормируемого значения  $\cos \varphi = 0,93$ , в работе принимается соответствующее ему значение  $\operatorname{tg} \varphi = 0,4$  [8].

Реактивная полная нагрузка потребителей электрической части ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы [11]:

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

Расчётный ток нормального режима потребителей электрической части ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы [11]:

$$I_{np} = \frac{S_{np}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном.}} \quad (4)$$

где  $U_{ном.}$  – номинальное напряжение сети, кВ [1].

На основании известных выражений (1) – (4) для расчёта электрических нагрузок потребителей в сети 110 кВ и 10 кВ, проводится практический расчёт активной, реактивной, полной нагрузок, а также расчётного тока нормального режима ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы.

Таким образом, на примере нагрузки потребителей 110 кВ подстанции, проведён проверочный расчёт электрических нагрузок.

Расчётная активная нагрузка потребителей 110 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы по условию (1):

$$P_{np} = 69,6 \cdot 1 = 69,6 \text{ МВт.}$$

Расчётная реактивная нагрузка потребителей 110 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы по условию (2):

$$Q_{np} = 69,6 \cdot 0,4 = 27,84 \text{ Мвар.}$$

Расчётная полная нагрузка потребителей 110 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы по условию (3):

$$S_{np} = \sqrt{69,6^2 + 27,84^2} \approx 74,96 \text{ МВА.}$$

Расчётный ток нагрузки потребителей 110 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы по условию (4):

$$I_{np} = \frac{74,96 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 110} = 393,5 \text{ A.}$$

Аналогично проведён расчёт электрических нагрузок сети потребителей 10 кВ понизительной подстанции ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы с приведением результатов расчёта в форме таблицы 6.

Также в таблице 6 расчёт суммарной нагрузки всей подстанции проводится с учётом коэффициента одновременности максимума нагрузки согласно методике [14].

Таким образом, значение расчётной активной нагрузки всей электрической части ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы [11]:

$$P_{\Sigma} = K_0 \sum_{i=1}^n P_{np}, \quad (5)$$

где  $\sum_{i=1}^n P_{np}$  – суммарная активная нагрузка всех потребителей,

получающих питание от секций сборных шин;

$K_0$  – значение коэффициента одновременности максимумов нагрузки на шинах РУ-220 кВ и РУ-110 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы.  $K_0 = 0,85$  [14].

Значение расчётной реактивной нагрузки всей электрической части ПС 220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы [11]:

$$Q_{\Sigma} = K_0 \sum_{i=1}^n Q_{np}, \quad (6)$$

где  $\sum_{i=1}^n Q_{np}$  – суммарная реактивная нагрузка всех потребителей,

получающих питание от секций сборных шин электрической части ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы.

Значение расчётной полной нагрузки всей электрической части ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы [11]:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2}. \quad (7)$$

Значение расчётного рабочего тока нагрузки нормального режима всей ПС 220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы [11]:

$$I_{\Sigma} = \frac{S_{\Sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном.}}. \quad (8)$$

Результаты расчёта нагрузок потребителей ОРУ-110 кВ, а также потребителей РУ-10 кВ и всей подстанции ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, представлены в работе в виде сводной таблицы 6.

Таблица 6 – Результаты расчёта электрических нагрузок ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы

Наименование потребителя	$P_p$ , МВт	$Q_p$ , Мвар	$S_p$ , МВА	$I_p$ , А
Нагрузка потребителей ОРУ-110 кВ подстанции	69,60	27,84	74,96	393,5
Нагрузка потребителей РУ-10 кВ подстанции	17,40	6,96	18,74	1082,0
Всего нагрузки ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» (на стороне 220 кВ)	87,00	34,80	93,70	245,8
Всего нагрузки ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» (220 кВ, $K_o = 0,85$ )	73,95	29,58	79,65	209,0

Полученные результаты расчёта электрических нагрузок потребителей и всей понизительной подстанции ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы используются в работе далее для выбора и проверки новых силовых автотрансформаторов, а также проводников и основного оборудования данной трансформаторной подстанции.



## 2.2 Выбор и проверка новых силовых автотрансформаторов

Как было указано ранее, на рассматриваемой в работе подстанции переменного напряжения ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы планируется проведения мероприятий по реконструкции, которая заключается в замене установленных на объекте автотрансформаторов АДТНГ-32000/220 на автотрансформаторы большей номинальной мощности марки АДЦТН-63000/220 (завод-изготовитель – ООО «Сиенс Энерджи Трансформаторы»). Они являются основным источником питания для всех потребителей во всех распределительных устройствах подстанции.

Таким образом, суммарная мощность понизительной подстанции ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы возрастёт с 64 МВА до 126 МВА.

Установлено, что суммарная полная расчётная мощность подстанции ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» ( $K_o = 0,85$ ) составила 79,65 МВА.

Проводится предварительная проверка правильности выбора силовых автотрансформаторов ТП-220/110/10 кВ «Чертаново», исходя из значения максимальной нагрузки подстанции.

Известно, что систематические перегрузки не ведут к сокращению срока службы изоляции трансформатора, допустимы в течении всего срока службы, следовательно, могут быть отнесены к нормальному режиму работы.

Они могут иметь место при неравномерном суточном графике нагрузки трансформатора или в условиях изменяющейся температуры охлаждающей среды при постоянной нагрузке.

В виду отсутствия суточных графиков нагрузки подстанции, выбор и проверку новых автотрансформаторов для установки на понизительной подстанции переменного напряжения ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, проводится расчётным путём.

Ранее установлено, что основными потребителями ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы являются отходящие ячейки 110 кВ, а также потребители РУ-10 кВ.

Расчётная мощность силового автотрансформатора для установки на подстанции, определяется по известной формуле [23]:

$$S_{\text{ном.т.р.}} = \frac{S_{p.ПС}}{2 \cdot 0,7}, \text{МВА}, \quad (9)$$

где  $S_{p.ПС}$  – расчётная нагрузка трансформаторной подстанции, принимается с учётом фактической суммарной нагрузки её потребителей и перспективы развития на 5 лет.

По условию (9) для силовых автотрансформаторов, устанавливаемых на ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы:

$$S_{\text{ном.т}} = \frac{79,65}{2 \cdot 0,7} \approx 56,9 \text{МВА}.$$

При проверке проводится сравнение номинальной мощности силового автотрансформатора и полученного значения расчётной мощности автотрансформатора ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы:

$$S_{\text{ном.т}} \geq S_{\text{ном.т.р.}}, \text{МВА}, \quad (10)$$

Соответственно, исходя из полученных результатов расчёта, установлено, что стандартная (паспортная) мощность автотрансформатора для установки на ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, равная 63 МВА, проходит проверку по установленной нагрузке.

Таким образом, предварительные условия проверки силовых автотрансформаторов, установленных на ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, по условию (10) выполняются:

$$S_{\text{ном.т}} = 63 \text{МВА} \geq S_{\text{ном.т.р}} = 56,9 \text{МВА}.$$

Далее в работе проводится проверка силовых автотрансформаторов на перегрузочную способность как в нормальном, так и в максимальном (послеаварийном) режиме работы [8].

Коэффициент загрузки автотрансформаторов в нормальном режиме его работы:

$$K_{3.H} = \frac{S_{ПС}}{2 \cdot S_{Т.НОМ}} \leq 0,7. \quad (11)$$

По условию (11) проверка выполняется:

$$K_{3.H} = \frac{79,65}{2 \cdot 63} = 0,63 \leq 0,7.$$

При таком выборе в аварийном режиме оставшийся в работе автотрансформатор должен обеспечить нормальное электроснабжение всех потребителей, перегружаясь при этом не более чем на 40 %.

Такая перегрузка допустима для автотрансформаторов в течение 6 часов в сутки не более 5 суток подряд.

Коэффициент загрузки автотрансформаторов в послеаварийном режиме (в работе остаётся один автотрансформатор):

$$K_{3.П} = \frac{S_{ПС}}{S_{Т.НОМ}} \leq 1,4. \quad (12)$$

По условию (12) проверка выполняется:

$$K_{3.П} = \frac{79,65}{63} = 1,26 \leq 1,4.$$

Все условия проверок выполняются в полном объёме.

Таким образом, установлено, что на подстанции ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы установленные новые автотрансформаторы марки АДЦТН-63000/220, выдержат систематическую нагрузку и допустимую перегрузку с учётом увеличения нагрузки потребителей.

Автотрансформатор силовой АДЦТН-63000/220 предназначен для питания потребителей, а также для связи электрических сетей разного напряжения и для регулировки потоков мощности и стабилизации уровня напряжения в рамках заданного диапазона в режиме нагрузки при помощи встроенных переключателей.

Автотрансформатор – это специализированный трансформатор, имеющий отличия от классической схемы трансформатора.

Его конструкция предусматривает соединение первичной и вторичной обмотки электрическим способом.

Трансформатор АДЦТН-63000/220 – наружного способа установки, изготавливаются в климатическом исполнении ХЛ1 или УХЛ1.

Преимуществом автотрансформатора перед классическим вариантом трансформатора, является более высокий КПД.

Магнитопровод в силовом масляном трехфазном трехобмоточном автотрансформаторе - однорамный трехстержневой.

Прессовка ярм осуществляется стальными полубандажами, а стержней – бандажами из стеклотары.

Обмотки выполнены из меди.

Для их устойчивости к короткому замыканию применяется транспонированный провод.

Потери холостого хода снижены за счёт качественной изоляции нового типа [22].

Охлаждение – масляное принудительное. Тип охлаждения – ДЦ.

Процесс охлаждения происходит в результате принудительной циркуляции масла через навесные внешние воздушные охладители.

Следовательно, на основании полученных результатов, установлено, что на подстанции ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы установленные новые автотрансформаторы марки АДЦТН-63000/220, выдержат систематическую нагрузку и допустимую перегрузку с учётом увеличения нагрузки потребителей.

Таким образом, в работе они окончательно принимаются для установки на данной понизительной подстанции вследствие увеличения нагрузки потребителей.

### **2.3 Расчёт токов короткого замыкания**

Далее в работе проводится расчёт значения максимального тока трёхфазного короткого замыкания на сборных шинах ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, по которому будут проверены на термическую и электродинамическую стойкость электрические аппараты и шинные конструкции, выбранные для установки в соответствующих распределительных устройствах подстанции.

Поэтому, так как номинальных ступеней напряжения в схеме объекта исследования три (220 кВ, 110 кВ и 10 кВ), на всех них проводится расчёт токов КЗ в максимальном режиме работы системы (режим трёхфазного КЗ).

В этом режиме на подстанции ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы в работе остаётся только один силовой автотрансформатор, который, по условиям резервирования, должен обеспечить питание всей нагрузки подстанции.

Также расчёту в работе подлежит ток двухфазного КЗ, который принимается как минимальный ток короткого замыкания при проверке чувствительности релейной защиты.

Так как на ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы установлены два одинаковые по номиналу и мощности силовые автотрансформаторы,

следовательно, результаты расчёта токов КЗ в сети 220 кВ, 110 кВ и 10 кВ за ними будут также одинаковы (с допустимой погрешностью).

Исходная расчётная схема для расчёта токов КЗ на понизительной подстанции ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы в работе представлена на рисунке 2.

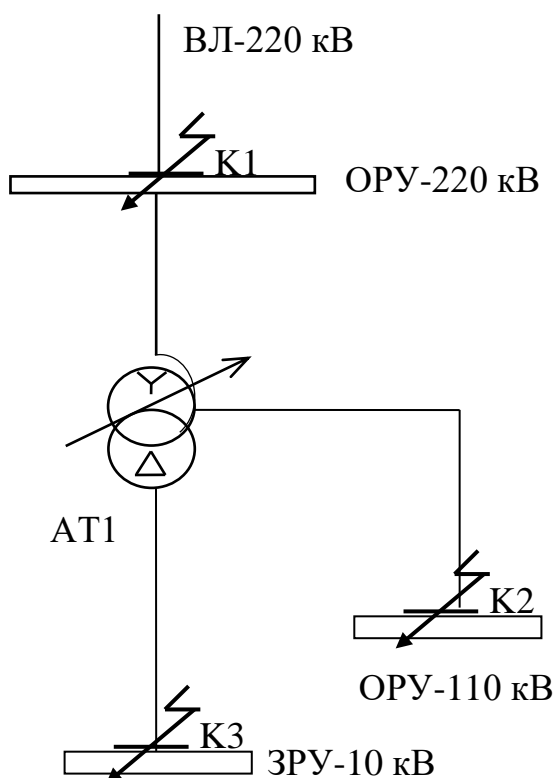


Рисунок 2 – Исходная расчётная схема для расчёта токов КЗ в системе ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы

Для составления схемы замещения, каждый элемент замещается эквивалентным сопротивлением.

Как правило, в сети напряжением выше 1 кВ решающее значение имеют индуктивные сопротивления элементов.

Значениями активных сопротивлений при расчёте токов КЗ в таком случае можно пренебречь [17].

В исходной схеме для расчёта токов КЗ необходимо учесть все основные элементы, которые влияют на результаты расчёта своими индуктивными

сопротивлениями, которые необходимо учитывать в данных схемах в первую очередь [12].

Составляется исходная схема замещения по расчётной схеме электрической сети. На схеме замещения указываются сопротивления всех элементов и точки для расчётов токов КЗ.

Силовые автотрансформаторы, имеющие три класса напряжения (220 кВ, 110 кВ и 10 кВ), на схеме замещения могут быть представлены в виде трёхобмоточных трансформаторов [10]. Схема замещения цепи КЗ, составленная, исходя из расчётной схемы, представлена на рисунке 3.

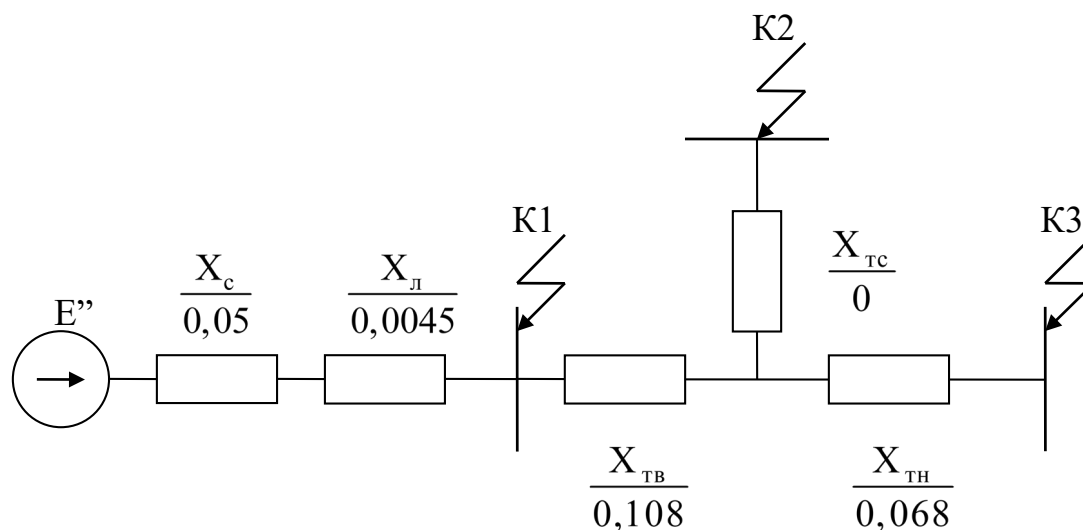


Рисунок 3 – Исходная схема замещения для расчёта токов КЗ на ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы

Расчет токов короткого замыкания в работе проводится в относительных единицах по методике, приведённой в [12].

Для проведения расчёта, на первом этапе принимаются базисные условия.

В качестве основной базисной ступени для расчёта в работе выбирается ступень высшего напряжения – 220 кВ.

Базисная мощность принимается равной номинальной мощности силового автотрансформатора ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, оставшегося в работе в послеаварийном режиме (при этом второй

трансформатор подстанции отключён, что отображено в расчётной схеме и схеме замещения, а также учтено при расчётах далее) [20]:

$$S_{\sigma} = 63000 \text{ кВА} = 63 \text{ МВА}.$$

Проводится выбор базисных напряжений для всех трёх ступеней трансформации в схеме (220 кВ, 110 кВ, 10 кВ).

В работе они принимаются в 1,05 раза выше соответствующих номинальных напряжений и должны совпадать с напряжениями на шинах АТ [17].

Базисное напряжение для ступени высшего напряжения АТ 220 кВ (основная ступень):

$$U_{\sigma 1} = 230 \text{ кВ}.$$

Базисное напряжение для ступени среднего напряжения АТ 110 кВ (неосновная ступень):

$$U_{\sigma 2} = 121 \text{ кВ}.$$

Базисное напряжение для ступени низшего напряжения АТ 10 кВ (неосновная ступень):

$$U_{\sigma 3} = 10,5 \text{ кВ}.$$

Базисный ток рассчитывается по известной формуле:

$$I_{\sigma} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3}U_{\sigma}}. \quad (13)$$



Проводится расчёт базисного тока для всех трёх ступеней трансформации в схеме (220 кВ, 110 кВ, 10 кВ) с учётом дальнейшего приведения к базисной мощности (мощность силового трансформатора подстанции).

Базисный ток для ступени высшего напряжения 220 кВ АТ (основная ступень):

$$I_{\delta 1} = \frac{63}{\sqrt{3} \cdot 230} = 0,16 \text{ кА.}$$

Базисный ток для ступени среднего напряжения 110 кВ АТ (неосновная ступень):

$$I_{\delta 2} = \frac{63}{\sqrt{3} \cdot 121} = 0,3 \text{ кА.}$$

Базисный ток для ступени низшего напряжения 10 кВ АТ (неосновная ступень):

$$I_{\delta 3} = \frac{63}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 3,46 \text{ кА.}$$

Далее проводится расчёт параметров схемы замещения ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы в относительных единицах, с последующим приведением их к именованным.

Сопротивление энергосистемы определяется по формуле:

$$x_c = \frac{S_{\sigma}}{S''_k}, \text{ o.e.}, \quad (14)$$

где  $S''_k$  - полная мощность трёхфазного КЗ на шинах энергосистемы.

По условию (14):

$$x_c = \frac{63}{1000} = 0,063 \text{ о.е.}$$

Сопротивление питающей ВЛ-220 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы с учётом её длины, в относительных единицах, при приведении к базисным условиям:

$$x_l = x_0 \cdot L \cdot \frac{S_{\bar{0}}}{U_{\bar{0}}^2}, \text{ о.е.}, \quad (15)$$

где  $x_0$  - удельное индуктивное сопротивление ВЛ, Ом/км [10];

$L$  - суммарная длина ВЛ, км.

Согласно условия (15), индуктивное значение сопротивления для питающей ВЛ-220 кВ:

$$x_l = 0,4 \cdot 6 \cdot \frac{63}{230^2} = 0,003 \text{ о.е.}$$

Далее проводится расчёт индуктивных сопротивлений силового автотрансформатора ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы с учётом паспортных данных, в относительных единицах, при приведении к базисным условиям [12].

Относительные сопротивления лучей схемы замещения автотрансформатора, приведенные к базисным условиям [12]:

$$x_{тв} = \frac{S_{\bar{0}}}{S_{ном}} \cdot \frac{0,5 \cdot (U_{к.вн}, \% + U_{к.вс}, \% - U_{к.сн}, \%)}{100}. \quad (16)$$

$$x_{mc} = \frac{S_{\bar{b}}}{S_{НОМ}} \cdot \frac{0,5 \cdot (U_{к.вс}, \% + U_{к.сн}, \% - U_{к.вн}, \%)}{100}. \quad (17)$$

$$x_{mn} = \frac{S_{\bar{b}}}{S_{НОМ}} \cdot \frac{0,5 \cdot (U_{к.вн}, \% + U_{к.сн}, \% - U_{к.вс}, \%)}{100}. \quad (18)$$

Проводятся соответствующие расчёты, в результате которых определяются относительные сопротивления лучей схемы замещения автотрансформатора, приведенные к базисным условиям:

$$x_{mv} = \frac{63}{63} \cdot \frac{0,5 \cdot (17,5 + 10,5 - 6,5)}{100} = 0,108 \text{ о.е.}$$

$$x_{mc} = \frac{63}{63} \cdot \frac{0,5 \cdot (10,5 + 6,5 - 17,5)}{100} = -0,0025 \approx 0 \text{ о.е.}$$

$$x_{mn} = \frac{63}{63} \cdot \frac{0,5 \cdot (17,5 + 6,5 - 10,5)}{100} = 0,068 \text{ о.е.}$$

Далее, исходя из определённых ранее индуктивных сопротивлений всех основных элементов схемы замещения, определяются результирующие (эквивалентные) сопротивления к каждой точке КЗ.

После этого определяется начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания [12] по следующему выражению с учётом результирующих сопротивлений к каждой точке КЗ, при приведении к базисным условиям, в именованных единицах [12]:

$$I_K^{(3)} = \frac{E''}{x_{рез}} \cdot I_{\bar{b}}. \quad (19)$$

Далее, исходя из определённых ранее индуктивных сопротивлений всех основных элементов схемы замещения, определяются результирующие (эквивалентные) сопротивления к каждой точке КЗ. Результирующее сопротивление к точке К1 в относительных расчётных единицах:

$$x_{рез.к1} = x_c + x_l, \text{ о.е.} \quad (20)$$

Согласно условия (20):

$$x_{рез.к1} = 0,063 + 0,003 = 0,066 \text{ о.е.}$$

Начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания в расчётной точке К1, при приведении к базисным условиям, в именованных единицах по (19):

$$I_{K1}^{(3)} = \frac{1}{0,066} \cdot 0,16 = 2,42 \text{ кА.}$$

Результирующее сопротивление к точке К2 в относительных расчётных единицах:

$$x_{рез.к2} = x_c + x_l + x_{тв} + x_{тс}, \text{ о.е.} \quad (21)$$

Согласно условия (21):

$$x_{рез.к2} = 0,063 + 0,003 + 0,108 + 0 = 0,174 \text{ о.е.}$$

Начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания в расчётной точке К2, при приведении к базисным условиям, в именованных единицах по (19):

$$I_{K2}^{(3)} = \frac{1}{0,174} \cdot 0,3 = 1,72 \text{ кА.}$$

Результирующее сопротивление к точке КЗ в относительных расчётных единицах:

$$x_{рез.кз} = x_c + x_l + x_{тв} + x_{тн}, о.е. \quad (22)$$

Согласно условия (22):

$$x_{рез.кз} = 0,063 + 0,003 + 0,108 + 0,068 = 0,242 о.е.$$

Начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания в расчётной точке КЗ, при приведении к базисным условиям, в именованных единицах по (19):

$$I_{КЗ}^{(3)} = \frac{1}{0,242} \cdot 3,46 = 14,3 \text{ кА.}$$

Значение «ударного тока» [12] или начального значения аperiodической составляющей тока КЗ в максимальном режиме:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot k_{уд} \cdot I_{КЗ}^{(3)}, \text{ кА,} \quad (23)$$

где  $k_{уд}$  – «ударный коэффициент» [12].

По условию (23) для расчётных точек схемы К1, К2 и К3, значение ударных токов (начального значения аperiodической составляющей тока КЗ) в именованных единицах:

– для ступени высшего напряжения 220 кВ АТ (основная ступень) в точке К1:

$$i_{уд1} = \sqrt{2} \cdot 1,7 \cdot 2,42 = 5,82 \text{ кА.}$$

- для ступени среднего напряжения 110 кВ АТ (неосновная ступень) в точке К2:

$$i_{уд2} = \sqrt{2} \cdot 1,4 \cdot 1,72 = 3,41 \text{ кА}.$$

- для ступени низшего напряжения 10 кВ АТ (неосновная ступень) в точке К3:

$$i_{уд3} = \sqrt{2} \cdot 1,25 \cdot 14,3 = 25,2 \text{ кА}.$$

Значение двухфазного тока КЗ, необходимое для определения надёжности РЗиА на подстанции:

$$I_K^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_K^{(3)}, \text{ кА}. \quad (24)$$

Значение двухфазного тока КЗ в расчётной точке К1 (ступень 1, класс напряжения – 220 кВ), необходимое для определения надёжности РЗиА:

$$I_{K1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 2,42 = 2,10 \text{ кА}.$$

Значение двухфазного тока КЗ в расчётной точке К2 (ступень 2, класс напряжения – 110 кВ), необходимое для определения надёжности РЗиА:

$$I_{K2}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 1,72 = 1,49 \text{ кА}.$$

Значение двухфазного тока КЗ в расчётной точке КЗ (ступень 3, класс напряжения – 10 кВ), необходимое для определения надёжности РЗиА:

$$I_{K3}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 14,3 = 12,38 \text{ кА.}$$

Все полученные в работе результаты расчёта токов короткого замыкания в максимальном режиме (начальное значение периодической составляющей тока трёхфазного короткого замыкания), а также величины ударных токов (начального значения апериодической составляющей тока КЗ) и значения минимального расчётного тока двухфазного короткого замыкания, полученные в результате расчёта на шинах 220 кВ, 110 кВ и 10 кВ в максимальном режиме работы ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты расчёта токов короткого замыкания, а также величины ударных токов, на шинах 220 кВ, 110 кВ и 10 кВ в максимальном режиме работы ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы

Параметр	Расчётная точка КЗ		
	Точка К1 (220 кВ)	Точка К2 (110 кВ)	Точка К3 (10 кВ)
$I_k^{(3)}$ , кА	2,42	1,72	14,30
$i_{уд}$ , кА	5,82	3,46	3,41
$I_k^{(2)}$ , кА	2,10	1,49	12,38

Полученные в работе результаты расчёта токов короткого замыкания, а также величины ударных токов, на шинах 220 кВ, 110 кВ и 10 кВ в максимальном режиме работы подстанции 220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, используются в работе для соответствующих проверок предварительно выбранного нового оборудования для установки в распределительных устройствах подстанции с целью её модернизации в работе далее.

## 2.4 Выбор и расчёт электрических проводников

Далее в работе необходимо провести выбор и проверочный расчёт проводников на питающей подстанции 220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы. В связи с заменой силовых автотрансформаторов на подстанции, для данной цели необходимо выбрать сечения таких проводников воздушных линий электропередачи:

- питающей воздушной линии напряжением 220 кВ;
- отходящих (распределительных) воздушных линий 110 кВ.

Все проводники на подстанции – класса напряжения выше 1 кВ, выполненные в виде воздушных линий передачи. Поэтому и методика выбора для них будет применена одинаковая.

Известно, что выбор сечений проводников напряжением выше 1 кВ (питающей воздушной линии напряжением 220 кВ и распределительных воздушных линий напряжением 110 кВ) ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, осуществляется по известному условию экономической плотности тока [11]:

$$F_{\text{э}} = \frac{I_{\text{р.}}}{j_{\text{э}}}, \quad (25)$$

где  $j_{\text{э}}$  – «экономическая плотность тока, А/мм<sup>2</sup>» [10].

Для проверки выбранного сечения проводников воздушных линий на понизительной подстанции ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» по условию нагрева током в послеаварийном режиме, необходимо рассчитать их максимальный ток послеаварийного режима работы с учётом условий резервирования в схеме.

По упрощённой методике, значение максимального тока ПАВ режима можно принять равным рабочему току, помноженному на коэффициент резервирования, равный 1,4 [11]:



$$I_{p.\max} = 1,4 \cdot \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном.}}} = 1,4 \cdot I_p. \quad (26)$$

где  $S_p$  – расчётная полная нагрузка воздушной линии, кВА;

$I_p$  – расчётный ток нормального режима соответствующей воздушной линии (таблица 4);

$U_{\text{ном}}$  – «номинальное напряжение линии, кВ» [10].

После выбора проводника воздушных линий, необходимо провести их проверку на работоспособность в нормальном и послеаварийном режимах работы.

Проверка выбранного сечения провода воздушных линий в нормальном режиме работы [11]:

$$I_{\text{доп}} \geq I_p, \quad (27)$$

где  $I_{\text{доп}}$  – «предельно – допустимое справочное значение тока выбранного проводника линии, А» [11].

Проверка выбранного сечения провода воздушной линии в послеаварийном режиме работы [10]:

$$I_{\text{доп}} \geq I_{p.\max}, \quad (28)$$

где  $I_{p.\max}$  – максимальный ток послеаварийного режима работы воздушной линии с учётом условий резервирования в схеме, А.

Кроме того, по механической прочности проводники воздушных линий должны быть не меньшего сечения чем стандартное минимально-допустимое сечение для условий местности по гололёду и ветру, с учётом типа опор и количества цепей линии, а также условий проверки на «корону»:

$$F_{ст} \geq F_{мин}, мм^2. \quad (29)$$

Таким образом, в данной работе, исходя из перечисленных условий, с учётом данных таблиц и диаграмм, приведённых в разделе 3 [10], минимальные сечения проводов АС [21]:

- для линий 220 кВ – не менее 240 мм<sup>2</sup>;
- для линий 110 кВ – не менее 120 мм<sup>2</sup>.

На основе приведённых расчётных формул согласно принятой методики выбора и проверки проводов воздушных линий электропередач, проводится проверка сечения провода питающей воздушной линии ВЛ-220 кВ ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы.

Питание ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» осуществляется от двух независимых источников питания с применением воздушных линий стандартным сечением 240 мм<sup>2</sup>.

Сечение питающей воздушной линии напряжением 220 кВ выбирается, исходя из номинальной мощности новых силовых автотрансформаторов, которые от неё питаются.

Как было указано ранее, на ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы в результате реконструкции были установлены два силовых автотрансформатора мощностью 63 МВА каждый, проверенные на перегрузочную способность в работе ранее. Расчётная нагрузка данных автотрансформаторов (расчётная нагрузка самой подстанции) рассчитана в работе ранее и составляет 79,65 МВА (таблица 6).

В связи с этим, ток нормального режима питающей ВЛ-220 кВ для питания каждого трансформатора ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы будет определяться по условию (8):

$$I_p = \frac{79,65 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220} \approx 209 \text{ А.}$$

Расчётное минимальное сечение питающей ВЛ-220 кВ понизительной подстанции переменного напряжения 220/110/10 кВ «Чертаново» по условию экономической плотности тока:

$$F_{\text{э}} = \frac{209}{1,1} = 190 \text{ мм}^2.$$

Исходя из результатов расчёта, принимается минимальное наименьшее сечение провода питающей ВЛ-220 кВ понизительной подстанции переменного напряжения 220/110/10 кВ «Чертаново», равное 240 мм<sup>2</sup>.

Таким образом, установлено, что сечение питающей ВЛ-220 кВ ТП-220/110/10 кВ «Чертаново», выполненное с применением проводов марок АСК-240 (ввод Т1 и Т2), соответствует условиям выбора и совпадает с фактическими сечениями проводов питающей линии 220 кВ, которые были до реконструкции подстанции.

Так как в работе проводится проверочный расчёт провода данной линии, сечение данных проводов ВЛ-220 кВ, питающей подстанцию, принимается за основу.

Проверка провода ВЛ-220 кВ по току нормального режима выполняется:

$$610 \text{ А} \geq 209 \text{ А}.$$

Значение максимального тока ПАВ режима провода ВЛ-220 кВ понизительной подстанции ТП-220/110/10 кВ «Чертаново», с учётом резервирования в схеме:

$$I_{\text{р.макс}} = 1,4 \cdot 209 \approx 292,6 \text{ А}.$$

Проверка проводов питающей ВЛ-220 кВ по максимальному току ПАВ режима выполняется:

$$610 A \geq 292,6 A.$$

Проверка выбранного сечения провода питающей ВЛ-220 кВ понизительной подстанции ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» по условию коронирующего разряда и механической прочности по гололёду и ветру также выполняется:

$$240 \text{ мм}^2 = 240 \text{ мм}^2.$$

Следовательно, в работе путём проведения соответствующих расчётов и проверок установлено, что сечение провода на питающей ВЛ-220 кВ ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» с применением проводов марки АСК-240, соответствует условиям выбора и совпадает с фактическими сечениями проводов данной питающей линии 220 кВ в реальных условиях.

Проверка сечений проводов отходящих линий напряжением 110 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» выполнены по аналогичной методике с приведением полученных результатов в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты проверочного расчёта проводников питающей и распределительных воздушных линий ПС-220/110/10 кВ «Чертаново»

Линия	$I_p$ , А	$F_{\Sigma}$ , мм <sup>2</sup>	$F_{ст}$ , мм <sup>2</sup>	$I_{p,max}$ , А	Марка провода	$I_{доп.}$ , А
Питающая ВЛ-220 кВ						
ВЛ-220 кВ-АТ1	209,0	190,0	240	292,6	АСК-240	610
ВЛ-220 кВ-АТ2	209,0	190,0	240	292,6	АСК-240	610
Распределительные ВЛ-110 кВ						
ВЛ-110 кВ-С41	196,75	178,9	185	250,4	АСК-185	520
ВЛ-110 кВ-С42	196,75	178,9	185	250,4	АСК-185	520

Таким образом, в работе расчётным путём, используя принятую методику выбора и проверки, подтверждены все сечения проводников питающей 220 кВ (провод марки АСК-240) [9].

Однако, исходя из полученных результатов расчёта, установлено, что в связи с увеличением нагрузки потребителей ОРУ-110 кВ, сечение воздушной

линии электропередачи рекомендовано заменить с марки АСК-120 на марку провода АСК-185.

Таким образом, будет выполнены условия проверки по нагрузочной способности распределительных воздушных линий 110 кВ на ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» с учётом увеличения нагрузки потребителей.

## **2.5 Выбор основного оборудования и его проверка**

Далее в работе, на основании технических данных подстанции и полученных расчётных результатов электрических нагрузок, рабочих и максимальных токов, а также токов трёхфазного КЗ, проводится непосредственный выбор и проверка основного оборудования с целью проведения модернизации ОРУ-220 кВ и ОРУ-110 кВ на ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы.

Ранее в работе было установлено, что к морально и технически устаревшим и выработавшим свой ресурс электрическим аппаратам, которые требуют замены на новые современные аппараты соответствующих марок, в ОРУ-220 кВ и ОРУ-110 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы относятся устаревшие масляные баковые выключатели высокого напряжения, которые являются морально и физически устаревшими марками оборудования, которое не производится с 90-х годов 20 века на заводах электрооборудования.

В работе они подлежат замене на современные выключатели, отличающиеся повышенными критериями надёжности, экономичности, безопасности, а также быстродействием и селективностью.

Также установлено, что в ОРУ-220 кВ и ОРУ-110 кВ также требуют замены разъединители.

При этом практическая замена выключателей и разъединителей в ОРУ-220 кВ и ОРУ-110 кВ проводится совместно с изменениями в схеме

электрических соединений объекта, что значительно упрощает задачу и ускоряет данный технологический процесс.

Далее на основании расчётов необходимо выбрать и проверить новые выключатели и разъединители для установки в ОРУ-220 кВ и ОРУ-110 кВ на подстанции ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы.

Для защиты и коммутации оборудования в ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы в РУ-220 кВ устанавливаются новые элегазовые высоковольтные выключатели марки ЛТВ-245Е1/В-31,5/2000 [8].

Известно, что выключатели высокого напряжения – это основные аппараты для защиты и коммутации электрической сети и единственные аппараты на подстанции, которыми можно отключать сеть под нагрузкой, а также они отключают сеть при возникновении ненормальных режимов (в частности, токов КЗ).

Поэтому к данным аппаратам предъявляются повышенные требования по коммутационной способности, а также по стойкости к сквозным токам КЗ и ударным токам.

Известно, что выбор выключателей высокого напряжения производится, исходя из следующих условий, приведённых далее [18].

«Выбор выключателей по номинальному напряжению:

$$U_{уст} \leq U_n. \quad (30)$$

Выбор выключателей по максимальному рабочему току:

$$I_{раб.макс} \leq I_n. \quad (31)$$

Проверка выключателя на симметричный ток отключения:

$$I_{нт} \leq I_{откн}. \quad (32)$$

где  $I_{\pi\tau}$  – значение периодической составляющей тока короткого замыкания в момент начала расхождения дугогасительных контактов;

$I_{отк.н}$  – номинальный ток отключения выбранного выключателя, кА» [18].

«Проверка выключателя на отключение асимметричного тока КЗ:

$$(\sqrt{2} \cdot I_{\pi\tau} + i_{a\tau}) \leq \sqrt{2} \cdot I_{отк.н} (1 + \beta_n), \quad (33)$$

где  $i_{a\tau}$  – значение аperiodической составляющей тока короткого замыкания в момент расхождения контактов;

$\beta_n$  – номинальное значение относительного содержания аperiodической составляющей в отключаемом токе КЗ;

$\tau$  – наименьшее время от начала короткого замыкания до момента расхождения дугогасительных контактов» [7].

«Наименьшее время от начала короткого замыкания до момента расхождения дугогасительных контактов, определяется так:

$$t = t_{з.мин} + t_{с.в}, \quad (34)$$

где  $t_{з.мин} = 0,01$  с – минимальное время действия релейной защиты;

$t_{с.в}$  – собственное время отключения выключателя» [18].

«На электродинамическую устойчивость выбранный выключатель проверяется по значению предельного сквозного тока КЗ:

$$i_y \leq i_{np.c}, \quad (35)$$

где  $i_{np.c}$  – действующее значение предельного сквозного тока КЗ;

$i_y$  – ударный ток короткого замыкания в цепи выключателя» [16].

«На термическую стойкость по значению теплового импульса:

$$B_K \leq I_T^2 t_T, \quad (36)$$

где  $B_K$  – тепловой импульс по расчёту,  $A^2 \cdot c$ ;

$I_T$  – предельный ток термической устойчивости,

$A^2 \cdot c$ ;  $t_T$  – длительность протекания,  $c$ » [11].

При этом:

$$B_K = I_K^2 (t_{отк} + T_a). \quad (37)$$

В ОРУ-220 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы предварительно выбран выключатель элегазовый марки ЛТВ-245Е1/В-31,5/2000, в ОРУ-110 кВ – выключатель ВРС-110/2500 УХЛ1 (таблица 9).

Таблица 9 – Результаты выбора новых выключателей высокого напряжения для установки в ОРУ-220 кВ и ОРУ-110 кВ на ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы

Наименование и место установки аппарата	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные технические данные
Выключатели ОРУ-220 кВ: ЛТВ-245Е1/В-31,5/2000	$U_{сети} \leq U_{ном.}$	$U_{сети} = 220 \text{ кВ.}$	$U_{ном} = 220 \text{ кВ.}$
	$I_{max} \leq I_{ном.}$	$I_{max} = 252,4 \text{ А.}$	$I_{ном} = 2000 \text{ А.}$
	$I_{н.т} \leq I_{отк.ном.}$	$I_{н.т} = 2,42 \text{ кА.}$	$I_{отк.ном} = 80 \text{ кА.}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 5,82 \text{ кА.}$	$i_{дин.} = 31,5 \text{ кА.}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T.$	$I_T^2 \cdot t_T = 2,42^2 \cdot 3 = 17,6 \text{ кА}^2 \text{с.}$	$B_K = 80^2 \cdot 3 = 19200 \text{ кА}^2 \text{с.}$
Выключатели ОРУ-110 кВ: ВРС-110/2500 УХЛ1	$U_{сети} \leq U_{ном.}$	$U_{сети} = 110 \text{ кВ.}$	$U_{ном} = 110 \text{ кВ.}$
	$I_{max} \leq I_{ном.}$	$I_{max} = 250,4 \text{ А.}$	$I_{ном} = 2500 \text{ А.}$
	$I_{н.т} \leq I_{отк.ном.}$	$I_{н.т} = 1,72 \text{ кА.}$	$I_{отк.ном} = 40 \text{ кА.}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 3,46 \text{ кА.}$	$i_{дин.} = 52 \text{ кА.}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T.$	$I_T^2 \cdot t_T = 1,72^2 \cdot 3 = 8,88 \text{ кА}^2 \text{с.}$	$B_K = 40^2 \cdot 3 = 4800 \text{ кА}^2 \text{с.}$



В выключателях 220 кВ и 110 кВ применяются встроенные трансформаторы тока, поэтому они отдельно не выбираются.

Далее проводится выбор и проверка новых разъединителей по условиям установки в ОРУ- 220 кВ и ОРУ-110 кВ на ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы в результате проведения реконструкции ОРУ 220 кВ данного объекта.

Разъединитель – это аппарат для обеспечения видимого разрыва с целью безопасного проведения работ в электроустановках. Таким образом, разъединитель – это очень важный аппарат по условиям электробезопасности.

В работе для установки в ОРУ-220 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы выбираются новые современные разъединители марки РГ-16-220/1000 УХЛ1, для установки в ОРУ-110 кВ – разъединители марки РГ-110/1000 УХЛ1 (производитель – ЗАО «ЗЭТО»).

Так как разъединители не отключают цепь под нагрузкой, они, в отличие от выключателей высокого напряжения, не проверяются на коммутационную способность при отключении токов КЗ согласно [12]. Результаты выбора и проверочного расчёта новых разъединителей в ОРУ-220 кВ и в ОРУ-110 кВ на ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Результаты выбора и проверочного расчёта разъединителей ОРУ-220 кВ и ОРУ-110 кВ на ПС-220/110/10 кВ «Чертаново»

Наименование и место установки аппарата	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные технические данные
Разъединители ОРУ-220 кВ: РГ-16-220/1000 УХЛ1	$U_{сети} \leq U_{ном.}$	$U_{сети} = 220 \text{ кВ.}$	$U_{ном} = 220 \text{ кВ.}$
	$I_{max} \leq I_{ном.}$	$I_{max} = 252,4 \text{ А.}$	$I_{ном} = 1000 \text{ А.}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 5,82 \text{ кА.}$	$i_{дин.} = 31,5 \text{ кА.}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T.$	$I_T^2 \cdot t_T = 2,42^2 \cdot 3 = 17,6 \text{ кА}^2\text{с.}$	$B_K = 80^2 \cdot 3 = 19200 \text{ кА}^2\text{с.}$
Разъединители ОРУ-110 кВ: РГ-110/1000 УХЛ1	$U_{сети} \leq U_{ном.}$	$U_{сети} = 110 \text{ кВ.}$	$U_{ном} = 110 \text{ кВ.}$
	$I_{max} \leq I_{ном.}$	$I_{max} = 250,4 \text{ А.}$	$I_{ном} = 1000 \text{ А.}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 3,46 \text{ кА.}$	$i_{дин.} = 52 \text{ кА.}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T.$	$I_T^2 \cdot t_T = 8,88 \text{ кА}^2\text{с.}$	$B_K = 4800 \text{ кА}^2\text{с.}$

Всё выбранное оборудование проверено на термическую и электродинамическую стойкость к токам короткого замыкания, а также на условие соответствия максимальным рабочим токам сети, рассчитанным в работе.

Установлено, что в результате проведения проверочных расчётов по выбору электрических аппаратов для установки в ОРУ-220 кВ и ОРУ-110 кВ ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы с целью её модернизации, все выбранные аппараты отвечают условиям всех требуемых проверок.

Все аппараты показаны на схеме электрических соединений ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы в графической части работы.

Таким образом, в работе приняты современные технические решения по выбору и проверке нового современного электрооборудования ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, включающие применение нового современного оборудования, которое характеризуется высокими техническими и экономическими характеристиками.

Выводы по разделу 2.

В работе, для подтверждения работоспособности схемы электрических соединений ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, обусловленная реконструкцией схемы ОРУ 220 кВ, проведено техническое обоснование следующих принятых решений:

- проведён расчёт нагрузки подстанции, а также расчёт токов короткого замыкания на выводах 220 кВ, 110 кВ и 10 кВ силовых автотрансформаторов в максимальном режиме работы;
- осуществлена проверка новых автотрансформаторов марки на перегрузочную способность. Расчётным путём в работе установлено, что на подстанции ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы установленные новые автотрансформаторы марки АДЦТН-63000/220, выдержат систематическую нагрузку и допустимую перегрузку с учётом увеличения нагрузки потребителей;

- выбраны и проверены сечения проводов воздушных линий питающей ВЛ-220 кВ, а также распределительных ВЛ-110 кВ. В работе расчётным путём подтверждены все сечения проводников питающей 220 кВ (провод марки АСК-240). Установлено, что в связи с увеличением нагрузки ОРУ-110 кВ, сечение воздушной линии рекомендовано заменить с марки АСК-120 на АСК-185;
- выбраны и проверены новые современные электрические аппараты для установки на объектах подстанции: в ОРУ-220 кВ выбраны выключатели элегазовые марки ЛТВ-245Е1/В-31,5/2000, в ОРУ-110 кВ – выключатель ВРС-110/2500 УХЛ1. Для установки в ОРУ-220 кВ выбраны новые современные разъединители марки РГ-16-220/1000 УХЛ1, для установки в ОРУ-110 кВ – разъединители марки РГ-110/1000 УХЛ1 (производитель – ЗАО «ЗЭТО»).

Таким образом, в работе расчётно-аналитическим путём решена комплексная задача по разработке, проверке и внедрению предложенных мероприятий по замене силовых автотрансформаторов на ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, реконструкции элемента схемы ОРУ 220 кВ и модернизации основного оборудования ОРУ-220 кВ и ОРУ-110 кВ данной подстанции с проверкой принятых технических решений.

### 3 Выбор устройств релейной защиты и автоматики

Далее в работе выбираются типы релейной защиты и автоматики для защиты основного оборудования подстанции – силовых трансформаторов и линий ОРУ 220 кВ на ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы.

На понижающем автотрансформаторе ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы предусмотрены следующие основных защит:

- дифференциальная токовая защита от внутренних повреждений автотрансформатора (далее – ДЗТ);
- газовая защита трансформатора, выполненная с возможностью действия на отключение и на сигнал (далее – ГЗ);
- максимальные токовые с выдержкой времени на каждой обмотке автотрансформатора с комбинированным пуском по напряжению от многофазных коротких замыканий (далее – МТЗ);
- токовая защита от перегрузки, установленная в одной фазе с выдержкой времени с действием на сигнал (далее – ЗП).

На питающих и транзитных линиях ОРУ 220 кВ предусмотрены следующие защиты:

- дифференциальная токовая защита линий (далее – ДЗЛ);
- максимальные токовые защита линий (далее – МТЗЛ), совмещённая с защитой от перегрузки линий.

Для корректного расчёта уставок РЗиА силового автотрансформатора ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, на первом этапе необходимо определить:

- первичный ток измерительных трансформаторов тока (далее – ТТ). При этом вторичный ток ТТ принимается равным 5 А на всех присоединениях схемы;
- коэффициент трансформации ТТ, определяемый отношением первичного и вторичного номинальных токов ТТ.

Данные параметры определяются, исходя из значения максимальных рабочих токов, рассчитанных в работе ранее.

На сторонах ВН (220 кВ) и СН (110 кВ) автотрансформаторов ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы принимается соединение ТТ и реле в схему «неполная звезда», на стороне НН (10 кВ) применяется схема «неполной звезды» [5].

Исходя из этого, полученные результаты первичных токов и коэффициентов трансформации ТТ, используемых для дальнейшего выбора уставок РЗА силовых автотрансформаторов, а также питающих и транзитных линий на ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, приводятся в форме таблице 11.

Таблица 11 – Результаты выбора первичных токов и коэффициентов трансформации ТТ на ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы

Номинальное напряжение	Элемент (присоединение)	$I_{\text{раб.макс}}, \text{ А}$	$I_{\text{ТТ}}, \text{ А}$	$K_{\text{Т}}$
Силовые автотрансформаторы				
220 кВ	Сторона ВН	292,6	300	60
110 кВ	Сторона СН	462,9	500	100
10 кВ	Сторона НН	5092,2	6000	1200
Питающие линии 220 кВ и распределительные линии 110 кВ				
220 кВ	ВЛ-220 кВ-АТ1	292,6	300	60
220 кВ	ВЛ-220 кВ-АТ2	292,6	300	60
110 кВ	ВЛ-110 кВ-С41	250,4	300	60
110 кВ	ВЛ-110 кВ-С42	250,4	300	60

Полученные данные используются в работе далее при расчёте уставок РЗА силовых автотрансформаторов, а также питающих и распределительных линий 220 кВ и 110 кВ на ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы.

Далее в работе, на основании полученные результаты выбора первичных токов и коэффициентов трансформации ТТ, используемых для дальнейшего выбора уставок РЗА силовых трансформаторов ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, проводится выбор уставок РЗА автотрансформаторов подстанции.

В качестве защиты трансформаторов ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы от межфазных КЗ, используется продольная дифференциальная токовая защита с абсолютной селективностью [13,14].

Ток срабатывания этой защиты для автотрансформатора определяется путём отстройки от тока небаланса:

$$I_{с.з} \geq K_n \cdot (I_{раб.макс.НН} - I_{раб.макс.СН} - I_{раб.макс.ВН}), \quad (38)$$

где  $I_{раб.макс.НН}$ ,  $I_{раб.макс.СН}$ ,  $I_{раб.макс.ВН}$  – соответственно максимальный рабочий ток на сторонах ВН (220 кВ), СН (110 кВ) и НН (10 кВ) силового автотрансформатора ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, А;

$K_n$  – коэффициент надёжности для ДЗ автотрансформатора [1].

Коэффициент чувствительности дифференциальной токовой защиты должен удовлетворять условию:

$$K_u = \frac{K_{сх}^{(к)}}{K_{сх}^{(3)}} \cdot \frac{I_{к.нач.мин}}{I_{с.з}} \geq 1,5. \quad (39)$$

Ток срабатывания продольной дифференциальной токовой защиты автотрансформаторов ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы:

$$I_{с.з} \geq 1,5 \cdot (5092,2 - 462,9 - 292,6) = 6505,1 \text{ А.}$$

Коэффициент чувствительности продольной дифференциальной токовой защиты трансформаторов ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы удовлетворяет требованиям [13]:

$$K_{\eta} = \frac{1}{1} \cdot \frac{12380}{6505,1} = 1,9 > 1,5.$$

Окончательно принимается для продольной ДЗТ автотрансформаторов ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы,  $I_{с.з} = 6505,1$  А.

Проводится выбор уставки защиты от перегрузки автотрансформаторов ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы.

Известно, что в силовых автотрансформаторах, защита от перегрузки устанавливается со стороны питания [13,14], значит, в работе данная защита устанавливается на стороне 220 кВ.

Для микропроцессорных блоков защит, защита от перегрузки отстраивается от максимального рабочего тока на стороне ВН силового трансформатора:

$$I_{с.з} \geq K_n \cdot I_{\text{раб. макс. ВН}}, \quad (40)$$

где  $K_n$  – коэффициент надёжности [13,14].

Ток срабатывания защиты от перегрузки трансформаторов ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы:

$$I_{с.з} \geq 1,05 \cdot 292,6 \approx 307,2 \text{ А.}$$

Защита от перегрузки трансформаторов ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы выполняется с действием на сигнал, так как даже при значительных перегрузках не требуется быстрого отключения трансформатора.

Проводится выбор уставки максимальной токовой защиты (МТЗ) трансформаторов ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы.

В работе МТЗ устанавливается как на стороне ВН (220 кВ), так и на стороне СН (110 кВ), и на стороне НН (10 кВ) силового трансформатора, обеспечивая, таким образом, резервирование и селективность.

Следовательно, в работе на силовом трансформаторе принимается три комплекта МТЗ. Ток срабатывания МТЗ силового трансформатора должен удовлетворять условиям, приведённым ниже [14].

Условие выбора уставки МТЗ заключается в отстройке от максимального рабочего тока трансформатора» [1]:

$$I_{с.з} \geq K_{отс} \cdot K_{сзн} \cdot I_{раб.макс}, \quad (41)$$

где  $K_{отс}$  - коэффициент отстройки;

$K_{сзн}$  - коэффициент самозапуска нагрузки.

Коэффициент чувствительности МТЗ определяется по формуле [19]:

$$K_{\psi} = \frac{K_{сх}^{(к)}}{K_{сх}^{(3)}} \cdot \frac{I_{к.мин}^{(к)}}{I_{с.з}} \geq 1,2, \quad (42)$$

где  $I_{к.мин}^{(к)}$  – минимальный ток при КЗ в конце защищенной линии;

$K_{сх}^{(3)}$  – коэффициент схемы соединения ТТ и реле;

$K_{сх}^{(к)}$  – коэффициент схемы соединения ТТ и реле при КЗ;

$I_{с.з}$  – ток срабатывания защиты.

Согласно [1], коэффициент чувствительности для рассчитываемой МТЗ силового трансформатора должен быть не менее 1,2 [8].

По приведённым выше условиям, далее в работе проводится расчёт МТЗ на сторонах 220 кВ, 110 кВ и 10 кВ силового автотрансформатора ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы.

Для комплекта МТЗ силового автотрансформатора ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы на стороне ВН (220 кВ):

$$I_{с.з} \geq 1,1 \cdot 1,6 \cdot 292,6 = 515,0 \text{ А.}$$



Коэффициент чувствительности МТЗ автотрансформатора на стороне ВН удовлетворяет требованиям [13]:

$$K_{\text{ч}} = \frac{1}{1} \cdot \frac{2100}{515} = 4,08 > 1,2.$$

Окончательно принимается для МТЗ силового автотрансформатора на стороне ВН  $I_{\text{с.з}} = 515 \text{ А}$ .

Так как селективность МТЗ обеспечивается подбором времени срабатывания (со стороны источника питания оно будет минимальное), принимается время срабатывания МТЗ силового автотрансформатора на стороне ВН, равное  $t_{\text{с.з}} = 1 \text{ с}$  (время срабатывания 0,5 с принимается для питающей ВЛ-220 кВ по условиям селективности и при ступени селективности, равной 0,5 с).

Аналогично рассчитаны уставки и время срабатывания МТЗ на сторонах 110 кВ и 10 кВ автотрансформатора ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы (таблица 12).

Таблица 12 – Результаты расчёта уставок МТЗ силового автотрансформатора ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы

Сторона трансформатора	$I_{\text{раб.макс}}, \text{ А}$	$I_{\text{с.з}}, \text{ А}$	$t_{\text{с.з}}, \text{ с}$
ВН (220 кВ)	292,6	515,0	1,0
СН (110 кВ)	462,9	814,7	1,5
НН (10 кВ)	5092,2	8962,3	2,0

МТЗ будет установлена на каждой из обмоток автотрансформатора подстанции для защиты от внутренних ненормальных режимов. Таким образом, силовые автотрансформаторы ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы защищены от основных ненормальных режимов с помощью токовых релейных защит микропроцессорных блоков.

Далее выбираются РЗиА питающих и отходящих линий подстанции.

В работе на ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы для защит питающих линий напряжений 220 кВ, а также распределительных линий 110 кВ, выбираются следующие защиты:

- дифференциальная защиты линий (ДЗЛ);
- максимальная токовая защита линий, совмещённая с защитой от перегрузки (МТЗЛ).

Выбор уставок ДЗЛ и МТЗЛ для защиты линий проводится аналогично выбору уставок данных защит для силовых трансформаторов, выполненных в работе ранее.

Ток срабатывания ДЗЛ определяется путём отстройки от максимального тока КЗ и значения максимального рабочего тока линии, с учётом коэффициента отстройки:

$$I_{с.з} \geq K_o \cdot I_{к.макс} + I_{раб.макс}, \quad (43)$$

где  $K_n$  – коэффициент надёжности ДЗЛ [13,14].

Коэффициент чувствительности ДЗЛ должен удовлетворять условию:

$$K_q = \frac{K_{сх}^{(к)}}{K_{сх}^{(3)}} \cdot \frac{I_{к.нач.мин}}{I_{с.з}} \geq 1,2. \quad (44)$$

Для питающей линии 220 кВ к ОРУ 220 кВ, токовая уставка и коэффициент чувствительности ДЗЛ:

$$I_{с.з} \geq 1,1 \cdot 2420 + 292,6 = 2954,6 \text{ А.}$$

$$K_q = \frac{1}{1} \cdot \frac{12380}{2954,6} = 4,19 \geq 1,2.$$

Аналогично проведён расчёт уставок ДЗЛ всех линий (таблица 13).

Таблица 13 – Результаты выбора уставок ДЗЛ питающих 220 кВ и распределительных линий 110 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы

Номинальное напряжение	Наименование линии	$I_{\text{раб.макс}}$ , А	$I_{\text{к.макс}}$ , А	$I_{\text{с.з}}$ , А
220 кВ	ВЛ-220 кВ-АТ1	292,6	2420,0	2954,6
220 кВ	ВЛ-220 кВ-АТ2	292,6	2420,0	2954,6
110 кВ	ВЛ-110 кВ-С41	250,4	1720,0	2142,4
110 кВ	ВЛ-110 кВ-С42	250,4	1720,0	2142,4

МТЗЛ линий выбирается из условия несрабатывания защиты в момент подключения дополнительной нагрузки.

С учётом равенства основной и дополнительной нагрузки, а также с учётом их равномерности, упрощённо выражение для выбора уставок МТЗЛ линий можно записать так:

$$I_{\text{с.з}} \geq K_{\text{отс}} \cdot K_{\text{сзн}} \cdot I_{\text{раб.макс}} \quad (45)$$

Коэффициент чувствительности МТЗЛ определяется по известной формуле [17]:

$$K_{\text{ч}} = \frac{K_{\text{сх}}^{(\text{к})}}{K_{\text{сх}}^{(3)}} \cdot \frac{I_{\text{к.мин}}^{(\text{к})}}{I_{\text{с.з}}} \geq 1,2, \quad (46)$$

Для питающей линии 220 кВ, токовая уставка МТЗЛ:

$$I_{\text{с.з}} \geq 1,3 \cdot 1,5 \cdot 292,6 = 570,6 \text{ А.}$$

Коэффициент чувствительности МТЗЛ этой питающей линии 220 кВ:

$$K_{\text{ч}} = \frac{1}{1} \cdot \frac{2100}{570,6} = 3,68 \geq 1,2. \quad (47)$$

Результаты выбора уставок МТЗЛ питающих и транзитных линий 220 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы представлены в сводной форме таблицы 14.

Также выбрано время срабатывания МТЗЛ линий, что обеспечивает селективность данной защиты (принята степень селективности  $\Delta t=0,5$  с).

Таблица 14 – Результаты выбора уставок МТЗЛ питающих 220 кВ и распределительных линий 110 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы

Номинальное напряжение	Наименование линии	$I_{\text{раб. макс}}, \text{ A}$	$I_{\text{с.з}}, \text{ A}$	$t_{\text{с.з}}, \text{ с}$
220 кВ	ВЛ-220 кВ-АТ1	292,6	570,6	0,5
220 кВ	ВЛ-220 кВ-АТ2	292,6	570,6	0,5
110 кВ	ВЛ-110 кВ-С41	250,4	488,3	1,5
110 кВ	ВЛ-110 кВ-С42	250,4	488,3	1,5

Выбранные уставки РЗА силовых автотрансформаторов, а также питающих 220 кВ и распределительных линий 110 кВ ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, показаны в работе на графическом листе 5.

Выводы по разделу 3.

В работе, на основании расчётных данных, проведён расчёт уставок основных защит силовых автотрансформаторов, а также питающих и транзитных линий ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы (дифференциальной защиты, защиты от перегрузки, максимальной токовой защиты).

Все выбранные уставки РЗА соответствуют требованиям нормативных документов и методик расчёта.

## 4 Расчёт молниезащиты и заземления подстанции

### 4.1 Расчёт заземления подстанции

Как известно, заземляющие устройства являются составной частью большинства электроустановок и служат для обеспечения необходимого уровня электробезопасности в зоне обслуживания электроустановки и за ее пределами.

Определение параметров заземления сводится к вычислению сопротивления выравнивающих полос заземления, образующих сетку, и количества вертикальных электродов.

В углах подстанции и на заземляющих устройствах электрического оборудования, должны быть установлены вертикальные электроды.

На ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы предусматривается защитное заземление, обеспечивающее защиту обслуживающего персонала от опасных напряжений прикосновения к металлическим частям, которые нормально не находятся под напряжением, но могут оказаться под напряжением из-за повреждения изоляции.

В качестве искусственных заземлителей применяются вертикальные или горизонтальные стальные стержни или полосы.

Размещение горизонтальных заземлителей ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы производится таким образом, чтобы достичь равномерного распределения электрического потенциала на площади, занятой оборудованием.

На территории ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, прокладывают заземляющие полосы на глубине 0,5 – 0,7 м вдоль рядов оборудования со стороны обслуживания на расстоянии 0,8 – 0,1 м [2].

Допустимое время воздействия на человека:

$$\tau_{\text{в}} = t_{\text{р.з.}} + t_{\text{отк.в}}, \text{ с.} \quad (48)$$

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

Определяется сопротивление растекания тока от ступней:

$$R_c = 1,5 \cdot \rho, \text{ Ом.} \quad (49)$$

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

Определяется коэффициент, определяемый по сопротивлению тела человека и сопротивлению растекания тока от ступней человека [3]:

$$\beta = \frac{R_q}{R_q + R_c}. \quad (50)$$

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

Определяется суммарная длина горизонтального заземлителя ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы:

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

Коэффициент напряжения прикосновения:

$$K_n = \frac{M \cdot \beta}{\left( \frac{l_g \cdot L_r}{a \cdot \sqrt{S}} \right)^{0,45}}. \quad (51)$$

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

Определяется напряжение на заземлителе:

$$U_3 = \frac{U_{np.\dot{d}on.}}{K_n}, \text{кВ.} \quad (52)$$

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

Определяется сопротивление заземляющего устройства:

$$R_{з.\dot{d}on.} = \frac{U_3}{I_3}, \text{Ом.} \quad (53)$$

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

Число ячеек по стороне квадрата:

$$m = \frac{L_r}{2 \cdot \sqrt{S}} - 1. \quad (54)$$

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

Принимается  $m=15$ .

Длина полос:

$$L_r^{15} = 2 \cdot \sqrt{S} \cdot (m+1), \text{м.} \quad (55)$$

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

Длина сторон ячеек:

$$b = \frac{\sqrt{S}}{m}, \text{м.} \quad (56)$$

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

Число вертикальных заземлителей по периметру контура ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы:

$$n_g = \frac{\sqrt{S} \cdot 4}{\frac{a}{l_g} \cdot l_g} \quad (57)$$

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

Принимается  $n_g=64$ .

Общая длина вертикальных заземлителей:

$$L_g = l_g \cdot n_g, \text{ м.} \quad (58)$$

$$L_g = 5 \cdot 64 = 320 \text{ м.}$$

Относительная глубина:

$$A = 0,444 - 0,84 \cdot \frac{l_g + t}{\sqrt{S}}, \text{ м.} \quad (59)$$

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

Определяется общее сопротивление сложного заземлителя:

$$R_3 = A \cdot \frac{\rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{L_r^{16} + L_g}, \text{ Ом.} \quad (60)$$

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

Общее сопротивление сложного заземлителя удовлетворяет минимальным условиям проверки:



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

Данное значение сопротивления заземлителя является допустимым.

Напряжение прикосновения:

$$U_{np} = K_n \cdot R_3 \cdot I_3, \text{ В.} \quad (61)$$

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

Условие выполняется, заземление выбрано верно.

План-схема сетки горизонтальных заземлителей ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы подстанции показан на графическом листе 6.

#### **4.2 Расчёт молниезащиты подстанции**

Как известно, от прямых ударов молнии электроустановки подстанции защищаются стержневыми молниеотводами.

Правильно выполненная молниезащита надежно защищает объект и, тем самым, значительно повышает его эксплуатационный показатели, а также значительно снижает вероятность возникновения аварий в результате прямых ударов молнии.

На ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы устанавливаются молниеотводы непосредственно на порталах, присоединенных к заземляющему контуру подстанции.

В соответствии с [15], устанавливается необходимый комплекс мероприятий и устройств, предназначенных для обеспечения безопасности людей (сельскохозяйственных животных), предохранения зданий, сооружений, оборудования и материалов от взрывов, пожаров и разрушений, возможных при воздействиях молнии.

Согласно [7], от стоек конструкции ОРУ с молниеотводами, должно быть обеспечено растекание тока молнии по магистралям заземления не менее чем в трех-четырех направлениях для ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы.

Кроме того, должно быть установлено соответственно два-три или один-два вертикальных электрода длиной 3-5м на расстоянии, не меньшим длины электрода.

Согласно [7], место присоединения конструкции со стержневым молниеотводом к заземляющему контуру подстанции расположено на расстоянии более 15м по магистралям заземления от места присоединения к нему трансформатора.

Защита ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы осуществляется стержневыми молниеотводами.

На высоте  $h_x$  защищаемого объекта (наиболее выступающие части оборудования и конструкций ОРУ 220 кВ) радиус действия молниеотвода определяется по формуле:

$$r_x = \frac{1,6 \cdot h_a}{1 + \frac{h_x}{h}} \cdot p, \quad (62)$$

где  $h=24$ м – высота молниеотвода;

$h_a$  – активная высота молниеотвода;

$h_x=12$ м - высота наиболее выступающих элементов ОРУ 220 кВ;

$p$  – коэффициент, равный 1 при высоте молниеотвода  $h < 30$ м.

$$h_a = h - h_x = 24 - 12 = 12 \text{ м.}$$

$$r_x = \frac{1,6 \cdot 12}{1 + \frac{12}{24}} \cdot 1 = 12,8 \text{ м.}$$

Наименьшая ширина зоны защиты  $b_x$  определяется по формуле:

$$b_x = 4 \cdot r_x \cdot \frac{7h_a - 1}{14h_a - a}. \quad (63)$$

Расстояние от оси установки молниеотводов до границы защищаемой зоны:

– по длине:

$$b_{x1} = 4 \cdot 12,8 \cdot \frac{7 \cdot 12 - 40}{14 \cdot 12 - 40} = 17,6 \text{ м.}$$

– по ширине:

$$b_{x2} = 4 \cdot 12,8 \cdot \frac{7 \cdot 12 - 42}{14 \cdot 12 - 42} = 17,1 \text{ м.}$$

Условие для защиты объекта высотой  $h_x$  внутри зоны защиты [4]:

$$D \leq 8 \cdot h_a \cdot p. \quad (64)$$

где  $D$  – наибольшая диагональ четырехугольника.

$$D = \sqrt{40^2 + 42^2} = 58 \text{ м.}$$

Проверяется условие:

$$D \leq 8 \cdot 12 \cdot 1 = 96 \text{ м.}$$

$$58 \text{ м} \leq 96 \text{ м.}$$

Условие выполняется.

Таким образом, принимается к установке на объекте четыре молниеотвода высотой 24 м.

Схема защиты ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы молниеотводами от прямых ударов молнии, а также общая зона действия четырёх стержневых молниеотводов, показана в графической части работы на листе 6.

Выводы по разделу 4.

В работе, рассчитаны заземление и молниезащита для установки на ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы.

Для реализации данной задачи, выбраны и проверены четыре вертикальных молниеотвода порталного типа, устанавливаемых по периметру подстанции ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы.

Установлено, что при высоте каждого из молниеотводов, равной 24 м, молниезащита ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы будет обеспечена в полном объёме во всех направлениях.

Таким образом, зона и радиус защитного сектора молниезащиты ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, удовлетворяет требуемым условиям и нормам.

## Заключение

В работе разработаны мероприятия по реконструкции схемы электрических соединений нормального режима трансформаторной подстанции ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы с модернизацией оборудования данной подстанции.

В работе приведено описание и анализ исходной схемы электрических соединений ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы.

На основании полученных аналитических данных проведённого анализа, установлено, что в работе рекомендуется внедрить предложенные мероприятия по реконструкции ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, которые осуществляются путём внедрения таких групп мероприятий:

- первая группа – замена силовых автотрансформаторов АДТНГ-32000/220 на понизительной подстанции ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, на автотрансформаторы большей номинальной мощности марки АДЦТН-63000/220 (завод-изготовитель – ООО «Сименс Энерджи Трансформаторы»);
- вторая группа – модернизация оборудования распределительных устройств ОРУ-220 кВ и ОРУ-110 кВ подстанции (выключателей высокого напряжения и разъединителей), путём их замены на современное оборудование соответствующих типов ведущих производителей;
- вторая группа – реконструкция схемы главных электрических соединений нормального режима ОРУ-220 кВ подстанции, в связи с увеличением нагрузки и заменой автотрансформаторов, путём восстановления второй ремонтной автоматической перемычки в виде технического блока «разъединитель-выключатель-разъединитель», которая была демонтирована на подстанции ранее в связи с отсутствием перетоков мощности в схеме «5Н» и её неиспользованием.

Установлено, что практическая реализация предложенных мероприятий по реконструкции ТП-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы с внедрением приведённых основных групп мероприятий, будет способствовать значительному повышению параметров надёжности, бесперебойности, электробезопасности и экономичности на объекте исследования.

В работе, для подтверждения работоспособности схемы электрических соединений ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, обусловленная реконструкцией схемы ОРУ 220 кВ, проведено техническое обоснование следующих принятых решений:

- проведён расчёт нагрузки подстанции, а также расчёт токов короткого замыкания на выводах 220 кВ, 110 кВ и 10 кВ силовых автотрансформаторов в максимальном режиме работы;
- осуществлена проверка новых автотрансформаторов марки на перегрузочную способность. Расчётным путём в работе установлено, что на подстанции ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы установленные новые автотрансформаторы марки АДЦТН-63000/220, выдержат систематическую нагрузку и допустимую перегрузку с учётом увеличения нагрузки потребителей;
- выбраны и проверены сечения проводов воздушных линий питающей ВЛ-220 кВ, а также распределительных ВЛ-110 кВ. В работе расчётным путём подтверждены все сечения проводников питающей 220 кВ (провод марки АСК-240). Установлено, что в связи с увеличением нагрузки ОРУ-110 кВ, сечение воздушной линии рекомендовано заменить с марки АСК-120 на АСК-185;
- выбраны и проверены новые современные электрические аппараты для установки на объектах подстанции: в ОРУ-220 кВ выбраны выключатели элегазовые марки ЛТВ-245Е1/В-31,5/2000, в ОРУ-110 кВ – выключатель ВРС-110/2500 УХЛ1. Для установки в ОРУ-220 кВ выбраны новые современные разъединители марки РГ-16-220/1000

- УХЛ1, для установки в ОРУ-110 кВ – разъединители марки РГ-110/1000 УХЛ1 (производитель – ЗАО «ЗЭТО»);
- на основании расчётных данных, проведён расчёт уставок основных защит силовых автотрансформаторов, а также питающих и транзитных линий ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы (дифференциальной защиты, защиты от перегрузки, максимальной токовой защиты);
  - рассчитаны заземление и молниезащита для установки на ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы. Для реализации данной задачи, выбраны и проверены четыре вертикальных молниеотвода порталного типа, устанавливаемых по периметру подстанции ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы. Установлено, что при высоте каждого из молниеотводов, равной 24 м, молниезащита ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы будет обеспечена в полном объёме во всех направлениях. Таким образом, зона и радиус защитного сектора молниезащиты ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, удовлетворяет требуемым условиям и нормам.

Исходя из полученных результатов можно утверждать, что в работе расчётно-аналитическим путём решена комплексная задача по разработке, проверке и внедрению предложенных мероприятий по замене силовых автотрансформаторов на ПС-220/110/10 кВ «Чертаново» г. Москвы, реконструкции элемента схемы ОРУ 220 кВ и модернизации основного оборудования ОРУ-220 кВ и ОРУ-110 кВ данной подстанции с проверкой принятых технических решений.

## Список используемых источников

1. Андреев В.А. Релейная защита систем электроснабжения в примерах и задачах. М.: Высшая школа, 2018. 256 с.
2. Булычев А.В. Релейная защита в распределительных электрических сетях. Пособие для практических расчетов. М.: НЦ ЭНАС, 2021. 208 с.
3. ГОСТ 29322-2014. «Напряжения стандартные» [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200115397> (дата обращения: 14.02.2023).
4. ГОСТ Р 59279-2020 «Схемы принципиальные электрические распределительных устройств от 35 до 750 кВ подстанций». [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200177281> (дата обращения: 14.02.2023).
5. Захаров О.Г. Цифровые устройства релейной защиты. Алгоритмы и уставки. М.: Энергоиздат, 2019. 640 с.
6. Кадомская К.П., Лавров Ю.А. Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Вологда: Инфра-Инженерия, 2018. 343 с.
7. Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов. М.: Academia, 2018. 320 с.
8. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: учеб. пособие для ВУЗов. 5-е издание, перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2018. 608 с.
9. Постановление Правительства от 16.02.2008 N 87 (ред. от 01.12.2021) «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию» [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/902087949> (дата обращения: 14.02.2023).
10. Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2019. 174 с.
11. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей.



- Госэнергоннадзор Минэнерго России. М.: ЗАО «Энергосервис», 2019. 324 с.
12. Правила устройства электроустановок. М.: Альвис, 2018. 632 с.
  13. Рожкова Л.Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций: учебник для студентов учреждений среднего профессионального образования. М.: ИЦ Академия, 2018. 448 с.
  14. Сибикин Ю.Д. Монтаж, эксплуатация и ремонт электрооборудования промышленных предприятий и установок. Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. 464 с.
  15. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. 4-е изд., перераб. и доп. М.: ЭНАС, 2018. 312 с.
  16. СТО 56947007- 29.240.30.047-2010. «Рекомендации по применению типовых принципиальных электрических схем распределительных устройств подстанций 35 - 750 кВ». [Электронный ресурс]: URL: <https://www.twirpx.com/file/2616342/> (дата обращения: 14.02.2023).
  17. СТО 56947007-29.240.30.010-2008. «Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35-750 кВ. Типовые решения». [Электронный ресурс]: URL: <https://www.twirpx.com/file/24666/> (дата обращения: 14.02.2023).
  18. Федеральный закон «Об электроэнергетике» от 26.03.2003 № 35-ФЗ об энергосбережении [Электронный ресурс]: URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_41502/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_41502/) (дата обращения: 27.01.2023).
  19. Шеховцов В.П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению. М.: Форум, Инфра. 2019. 136 с.
  20. Энергетическая стратегия на период до 2035 года. Распоряжение Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р. М.: МЭ, 2020. 142 с.
  21. Chen C.S. Development of distribution feeder loss models by artificial neural networks. IEEE Transactions on Power Systems, 2018. Vol. 19, 4. P. 1056–1062.
  22. Kang Meei – Song. A Systematic Loss Analysis of Taipower Distribution

System. IEEE Transactions on Power Systems. 2019. vol. 21, 3. P. 1062–1068.

23. Yourdon E. Modern Structured Analysis. N.J.: Yourdon Press/Prentice Hall. Thinking Machines - a New Field in Electrical Engineering. Columbia Eng. 2020. № 3.

24. Zadeh L.A. The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning, Part 1, 2, 3. Information Sciences. 2018. Vol. 9. P. 43 – 80.

25. Zadeh L.A. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 2021. Vol. SMC 3. P. 28 – 44.