

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки/ специальности)

Электроснабжение

(направленность (профиль) / специализация)

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Проектирование электрической части ПС 220 кВ ПАО «Северсталь»

Обучающийся

В.В. Кудашев

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

д.т.н., профессор В.В. Вахнина

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

Консультант

к.п.н., доцент А.В. Егорова

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

Тольятти 2024

## Аннотация

В ВКР выполнено проектирование подстанции 220 кВ ПАО «Северсталь» – крупнейшего предприятия России в области горнодобывающей и металлургической промышленности. Поэтому для выполнения цели ВКР – проектирование электрической части ПС 220 кВ ПАО «Северсталь», обеспечивающей надежное функционирование потребителей предприятия, на ПС 220 кВ установлено два автотрансформатора мощностью по 125 МВА каждый.

В ВКР для достижения цели решены следующие задачи:

- анализ нагрузок подстанции;
- выбор основного электрооборудования ПС 220 кВ;
- анализ требований к релейной защите ПС 220 кВ, выбор релейной защиты ВЛ 220 кВ ПС 220 кВ.

В ВКР распределительные устройства ПС 220 кВ ПАО «Северсталь» в соответствии с техническими условиями на техническое присоединение к сетям ПАО «ФСК ЕЭС» энергопринимающих устройств предприятия приняты открытого типа. Схемы ОРУ 220 кВ, ОРУ 110 кВ, КРУ 10 кВ выбраны типовыми в соответствии с требованиями стандарта организации ПАО «ФСК ЕЭС». Выполнен выбор и проверка коммутационного и измерительного оборудования на токи КЗ для наиболее тяжелого аварийного режима.

Выполнен расчет релейной защиты питающих линий ВЛ 220 кВ. Для реализации релейной защиты ВЛ 220 кВ к установке приняты цифровые шкафы типа ШЭ2607 011021.

Объем пояснительной записки 50 страниц, графической части – 6 листов.

## **Abstract**

The design of the 220 kV substation of «Severstal», the largest Russian enterprise in the field of mining and metallurgical industries, was completed.

The goal of the work is to design the electrical part of a 220 kV substation, ensuring reliable operation of the enterprise's consumers. To achieve the goal, the following tasks have been set:

- analysis of substation loads;
- selection of the main electrical equipment of the substation;
- analysis of requirements for relay protection of a substation, selection of relay protection for 220 kV supply lines. At the 220 kV substation, two autotransformers with a capacity of 125 MVA each are installed. The switchgear of the 220 kV substation, in accordance with the technical specifications, is of an open type. The diagrams of open switchgears 220 kV, outdoor switchgear 110 kV and complete switchgear 10 kV are selected as standard. The selection and testing of switching and measuring equipment for short circuit currents for the most severe emergency conditions has been carried out.

The calculation of relay protection of the supply lines of 220 kV overhead lines has been carried out. The calculation of relay protection of 220 kV supply lines has been carried out. For relay protection of 220 kV supply lines, «Ekra» digital cabinets have been adopted for installation.

The volume of the explanatory note is 50 pages, the graphic part is 6 sheets.

## Содержание

Введение .....	5
1 Описание ПС 220 кВ ПАО «Северсталь».....	7
2 Обоснование выбора и выбор автотрансформаторов ПС 220 кВ ПАО «Северсталь».....	10
3 Выбор схем открытых распределительных устройств ПС 220 кВ ПАО «Северсталь».....	13
4 Собственные нужды подстанции.....	16
5 Выбор электрооборудования ОРУ 220 кВ и 110 кВ ПС 220 кВ ПАО «Северсталь».....	18
5.1 Токи КЗ для выбора электрооборудования ОРУ 220 кВ и 110 кВ ПС 220 кВ ПАО «Северсталь».....	18
5.2 Коммутирующее оборудование ОРУ 220 кВ и 110 кВ, КРУ 10 кВ.....	20
5.3 Измерительные трансформаторы тока и напряжения ОРУ 220 кВ и 110 кВ, КРУ 10 кВ.....	22
5.4 ОПН для ОРУ 220 кВ и ОРУ 110 кВ.....	23
6 Расчет релейной защиты питающей сети 220 кВ ПС 220 кВ ПАО «Северсталь».....	25
6.1 Определение параметров схемы замещения исследуемой сети 220 кВ и 110 кВ.....	26
6.2 Расчет дистанционной защиты ВЛ 220 кВ «Северсталь-1».....	27
6.3 Характеристика срабатывания реле сопротивлений первой, второй и третьей ступеней ДЗ воздушных линий 220 кВ «Северсталь-1» и «Северсталь-2» ПС 220 кВ.....	40
Заключение .....	46
Список используемой литературы и используемых источников .....	47

## Введение

В рамках реализации национального проекта Минэнерго России «Разработка и внедрение цифровых электрических подстанций и станций на вновь строящихся и реконструируемых объектах энергетики» [17] актуальной является задача автоматизации распределительных электрических сетей, что позволит обеспечить надежное электроснабжение всех потребителей. Цифровизация является основным трендом, которая определяет развитие электрических сетей в XXI веке. Необходимы пилотные проекты по внедрению цифровых подстанций в электрические сети, начиная от распределительных сетей 6 – 110 кВ (в ряде случаев 220 кВ), до магистральных 220 – 750 кВ. Необходимо также широкое внедрение цифровых релейных защит и систем автоматики в электрических сетях для своевременного обнаружения и локализации аварийных ситуаций. Поэтому в национальном проекте для этого предусмотрены следующие комплексные решения:

- «сооружение двух или более питающих линий;
- установка на каждой подстанции (ПС) не менее двух понижающих трансформаторов;
- секционирование линий электропередачи и распределительных устройств коммутационными аппаратами;
- использование совершенных средств управления, цифровой защиты и противоаварийной автоматики (ЦЗиПА)» [17].

Современные подстанции, спроектированные и возведенные в рамках национального проекта, позволяют:

- «обеспечивать максимальную автоматизацию процессов измерения, управления и защиты оборудования;
- выполнять мониторинг функционирования всех систем удаленно из диспетчерской;
- минимизировать время, затрачиваемое на базовые операции в процессе эксплуатации, и уменьшить влияние человеческого фактора на

производственный процесс за счет автоматизированное управления процессами;

- снизить до минимума количество персонала за счет интеллектуальных системы управления и диагностики для обслуживания» [17].

Основное электротехническое оборудование ПС дает возможность передавать первичную информацию из систем измерения и мониторинга по протоколам МЭК-61850 стандарта IEC 61850-5, «описывающий форматы потоков данных, виды информации, правила описания элементов энергообъекта и свод правил для организации событийного протокола передачи данных» [29]. В перспективе это позволит обрабатывать данные с применением предиктивной аналитики и искусственного интеллекта с дальнейшей интеграцией решений в информационную систему техобслуживания и ППР. Следует отметить, что внедрение цифровых технологий на ПС в ПАО «Россети» позволит «построить единую большую систему на базе компонентов, позволяющих выстроить оптимальный режим системы в целом и достигнуть общесистемный, а не локальный оптимум» [32] на базе широкого внедрения «гибких технических решений, позволяющих реализовать самоподобность электрической сети на всех уровнях – от приема электроэнергии до распределения конечным потребителям» [30]. Цифровые сети имеют большое будущее, так как на базе «цифровых технологий будет обеспечена надежная, безопасная и эффективно управляемая работа электрической сети» [28].

Цель ВКР – проектирование электрической части ПС 220 кВ ПАО «Северсталь», обеспечивающей надежное функционирование потребителей предприятия.

В ВКР для достижения цели решаются следующие задачи:

- анализ нагрузок подстанции;
- выбор основного электрооборудования ПС 220 кВ;
- анализ требований к релейной защите ПС 220 кВ, выбор релейной защиты ВЛ 220 кВ ПС 220 кВ.

## 1 Описание ПС 220 кВ ПАО «Северсталь»

Подстанция 220 кВ ПАО «Северсталь» является одним из ключевых элементов Вологодско-Череповецкого энергоузла Вологодской энергосистемы. Она включена в транзит 220 кВ между такими крупными энергообъектами как ПС 500 кВ «Череповецкая» и ПС 750 «Белозерская». От ее стабильной работы зависит надежность электроснабжения металлургического комбината ОАО «Северсталь».

Принципиальная схема проектируемой подстанции приведена на рисунке 1.

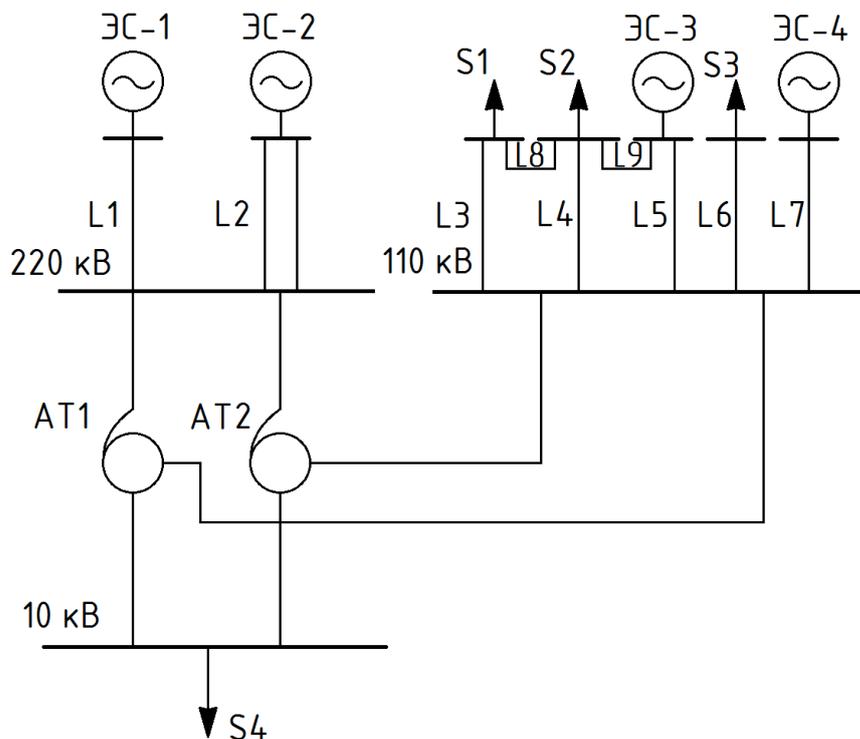


Рисунок 1 – Принципиальная схема ПС 220 кВ ПАО «Северсталь»

К сети 220 кВ ПС 220 кВ ПАО «Северсталь» подключены следующие воздушные линии:

- «Северсталь-1» (L1 на рисунке 1),

- «Северсталь-2» (L2 на рисунке 1).

Длина воздушных линий 220 кВ составляет соответственно 50 км и 140 км.

К сети 110 кВ ПС 220 кВ ПАО «Северсталь» подключены следующие двухцепные воздушные линии:

- «Металлургическая-1» (L3 на рисунке 1),
- «Металлургическая-2» (L4 на рисунке 1),
- «Металлургическая-3» (L5 на рисунке 1),
- «Металлургическая-4» (L6 на рисунке 1),
- «Металлургическая-5» (L7 на рисунке 1),
- «Череповец-1» (L8 на рисунке 1),
- «Череповец-2» (L9 на рисунке 1),

Длина воздушных линий 110 кВ составляет от 10 км до 25 км.

Технологические характеристики воздушных линий 220 кВ и 110 кВ приведены в таблице 1 [1].

Таблица 1 – Технологические характеристики воздушных линий 220 кВ и 110 кВ ПС 220 кВ ПАО «Северсталь»

Наименование ВЛ	Марка провода	Допустимый ток линии $I_{\text{доп}}$ , А при $t=-5^{\circ}$ / $+25^{\circ}$	Аварийно допустимый ток линии $I_{\text{ав.доп}}$ , А при $t=-5^{\circ}$ / $+25^{\circ}$	Протяженность линии L, км
ВЛ 220 кВ «Северсталь-1»	АС-400	1000/825	1000/990	50
ВЛ 220 кВ «Северсталь-2»	АС-400	1000/825	1000/990	140
ВЛ 110 кВ «Металлургическая -1»	АС-240	581/450	630/540	20
ВЛ 110 кВ «Металлургическая -2»	АС-240	581/450	630/540	15
ВЛ 110 кВ «Металлургическая -3»	АС-185	520/381	520/381	15
ВЛ 110 кВ «Металлургическая -4»	АС-185	520/381	520/381	25
ВЛ 110 кВ «Металлургическая -5»	АС-185	520/381	520/381	10
ВЛ 110 кВ «Череповец-1»	АС-150	450/331	450/331	10
ВЛ 110 кВ «Череповец-2»	АС-150	450/331	450/331	10

Для обеспечения надежного электроснабжения потребителей ПАО «Северсталь» в соответствии с техническими условиями на техническое присоединение к сетям ПАО «ФСК ЕЭС» энергопринимающих устройств ПАО «Северсталь» на ПС 220 кВ предусматривается установка двух автотрансформаторов напряжением 220/110/10 кВ, оснащенных устройством РПН [25].

На ПС 220 кВ ПАО «Северсталь» расположены два открытых комплектных распределительных устройства ОРУ 220 кВ и ОРУ 110 кВ, а также КРУ 10 кВ. Воздушной линией 220 кВ «Северсталь-2» длиной 140 км предусмотрен транзит мощности на ПС 500 кВ «Череповецкая» с последующим транзитом на ПС 750 «Белозерская». Для этого на ПС предусмотрены дополнительные ячейки на ОРУ 220 кВ.

Выводы по разделу. Рассмотрена общая информация о ПС 220 кВ, приведена принципиальная схема ПС 220 кВ, приведены технологические характеристики воздушных линий 220 кВ и 110 кВ.

## 2 Обоснование выбора и выбор автотрансформаторов ПС 220 кВ ПАО «Северсталь»

Для выбора автотрансформаторов исходными данными являются данные по внешней энергосистеме 220 кВ (входные мощности КЗ и сопротивления энергосистемы), которые приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Данные по внешней энергосистеме 220 кВ

Внешняя энергосистема ЭС1		Внешняя энергосистема ЭС2	
SЭС1, МВА	XС1 <sub>ном</sub> , о.е.	SЭС2, МВА	XС2 <sub>ном</sub> , о.е.
2000	1,0	3000	1,2

Уровни нагрузки по воздушной сети 110 кВ и 10 кВ ПС 220 кВ ПАО «Северсталь» приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Уровни нагрузки по воздушной сети 110 кВ и 10 кВ ПС 220 кВ ПАО «Северсталь»

Нагрузки по воздушной сети 110 кВ			Нагрузки по воздушной сети 10 кВ		
U <sub>ном</sub> , кВ	P <sub>нг макс</sub> , МВт	cosφ <sub>ном</sub>	U <sub>ном</sub> , кВ	P <sub>нг макс</sub> , МВт	cosφ <sub>ном</sub>
110	70	0,85	10	50	0,85

Из графиков нагрузки сетей 110 кВ и 10 кВ в процентах получен суммарный график нагрузки сети 220 кВ в МВА, используя формулу [12]:

$$S_{нг_i} = \frac{P_{нг_i}}{\cos \varphi_{ном}}. \quad (1)$$

Результаты расчетов для зимнего и летнего периодов проведены по методике [15] и приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Суммарный график нагрузки сети ВН в МВА ПС 220 кВ ПАО «Северсталь»

Зима	0-6 ч	6-12 ч	12-16 ч	16-22 ч	22-24 ч
$S_{НН}$ , МВА	29,412	41,176	35,294	58,824	29,412
$S_{СН}$ , МВА	32,941	49,412	49,412	82,353	49,412
$S_{ВН}$ , МВА	62,353	90,588	84,706	141,177	78,824
Лето	0-6 ч	6-12 ч	12-16 ч	16-22 ч	22-24 ч
$S_{НН}$ , МВА	17,647	29,412	23,259	41,176	17,647
$S_{СН}$ , МВА	24,706	41,176	41,176	57,647	41,176
$S_{ВН}$ , МВА	43,353	70,588	64,435	98,823	58,823

Таблица 4 позволила построить суточный график нагрузки полной мощности автотрансформаторов ПС 220 кВ ПАО «Северсталь» на стороне ВН (рисунок 2).

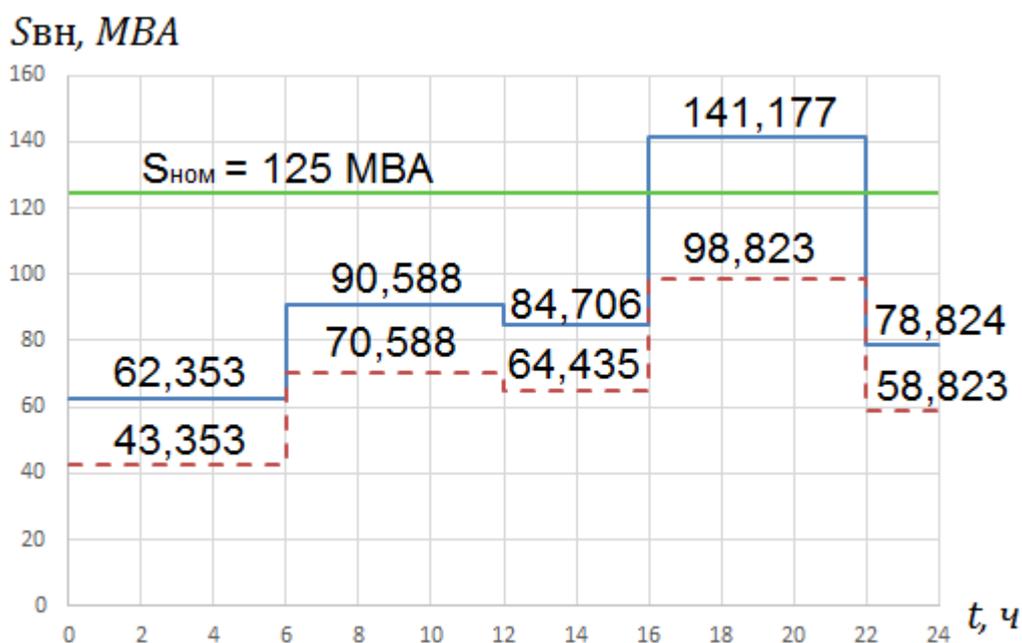


Рисунок 2 – Суточный график нагрузки полной мощности автотрансформаторов ПС 220 кВ ПАО «Северсталь» на стороне ВН

Наибольшая мощность, протекающая через автотрансформаторы ПС 220 кВ в нормальный режим  $S_{наиб.} = 141,177$  МВА.

Выбрано два автотрансформатора АДЦТН-125000/220/110 [11]. Технологические характеристики выбранных автотрансформаторов АДЦТН-125000/220/110 [10] приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Технологические характеристики выбранных автотрансформаторов АДЦТН-125000/220/110 ПС 220 кВ ПАО «Северсталь»

$S_{\text{ном}}$ , МВА	$U$ , кВ			$u_{\text{к\%}}$ , %		
	ВН	СН	НН	ВС	ВН	СН
125	230	121	10,5	11	45	28
	$R$ , Ом			$X$ , Ом		
	ВН	СН	НН	ВН	СН	НН
	0,52	0,52	3,2	49,0	0	131
	$\Delta P_{\text{к}}$ , кВт	$\Delta P_{\text{х}}$ , кВт	$I$ , %		$\Delta Q_{\text{х}}$ , квар	
	305	65	0,5		625	

Первый автотрансформатор АТ-1 обеспечивает питание 1 сек. 220 кВ ОРУ 220 кВ и 1 сек. 110 кВ ОРУ 110 кВ. Второй автотрансформатор АТ-2 обеспечивает питание 2 сек. 220 кВ ОРУ 220 кВ и 2 сек. 110 кВ ОРУ 110 кВ.

Выводы по разделу. Определены исходные данные внешней энергосистемы 220 кВ и уровни нагрузки по воздушной сети 110 кВ и 10 кВ, что позволило рассчитать наибольшую мощность, протекающую через автотрансформаторы, и выбрать количество и тип автотрансформаторов на ПС 220 кВ ПАО «Северсталь».

### 3 Выбор схем открытых распределительных устройств ПС 220 кВ ПАО «Северсталь»

Распределительные устройства ПС 220 кВ ПАО «Северсталь» в соответствии с техническими условиями на техническое присоединение к сетям ПАО «ФСК ЕЭС» энергопринимающих устройств ПАО «Северсталь» принимаем открытого типа. Схемы ОРУ 220 кВ и ОРУ 110 кВ выбраны типовыми в соответствии с требованиями стандарта организации ПАО «ФСК ЕЭС» [21]. В соответствии с требованиями п. 1.6.3 СТО 56947007-29.240.30.010-2008 в ОРУ 220 кВ принята «схема мостик с выключателями в цепях трансформаторов и ремонтной перемычкой со стороны линий» [21], которая приведена на рисунке 3.

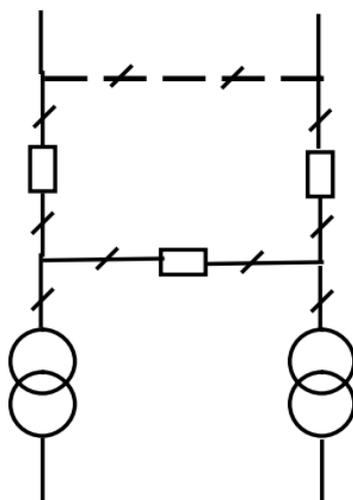


Рисунок 3 – Принятая схема на ОРУ 220 кВ

В соответствии с требованиями п. 1.8.4 СТО 56947007-29.240.30.010-2008 в ОРУ 110 кВ из-за большого количества отходящих воздушных линий 1100 кВ принята «схема одна рабочая секционированная выключателем и обходная системы шин» [21], которая приведена на рисунке 4.

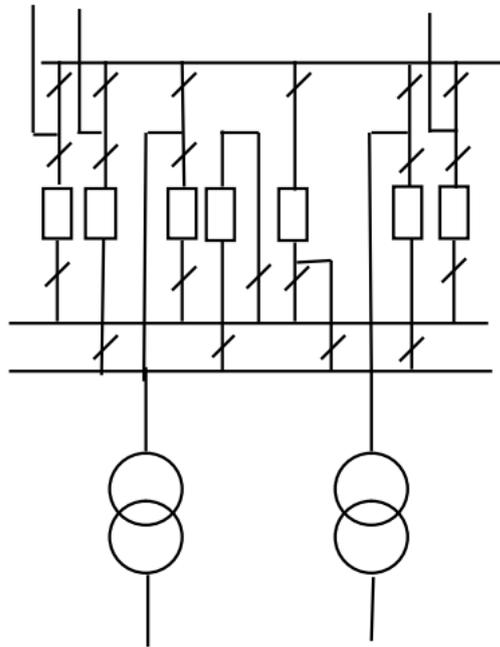


Рисунок 4 – Принятая схема на ОРУ 110 кВ

На всех выключателях 220 кВ и 110 кВ предусматривается установка разъединителей. В цепях автотрансформаторов и всех выключателей 220 кВ и 110 кВ устанавливаются трансформаторы тока, на шинах 220 кВ и 110 кВ устанавливаются трансформаторы напряжения, со стороны автотрансформаторов в цепях 220 кВ и 110 кВ устанавливаются ОПН.

Принятые схемы электрических соединений ОРУ 220 кВ и ОРУ 110 кВ ПС 220 кВ обеспечивают «коммутацию заданного числа высоковольтных линий и автотрансформаторов» [21], а также требуемый уровень надежности электроснабжения потребителей предприятия ПАО «Северсталь».

Для КРУ 10 кВ на основании п. 1.11.2 СТО 56947007-29.240.30.010-2008 выбрана «схема 10(6)-1 – одна секционированная выключателем (или двумя выключателями) система шин применяется при двух трансформаторах, каждый из которых присоединен к одной секции (возможно к обеим секциям)» [21], которая приведена на рисунке 5.

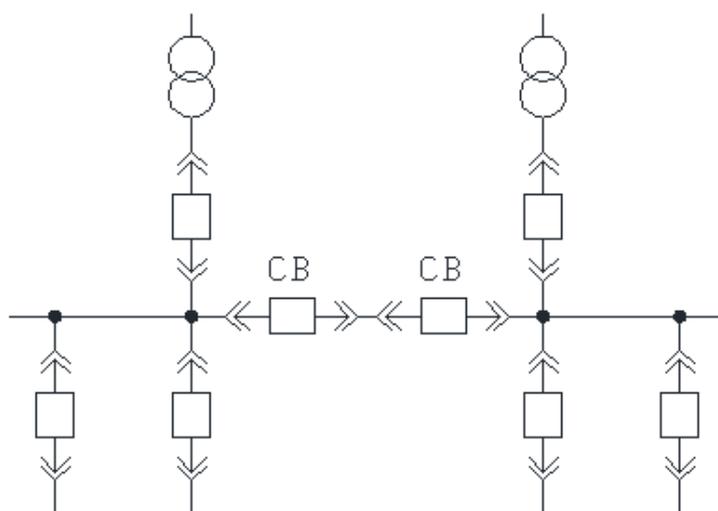


Рисунок 5 – Принятая схема КРУ 10 кВ

Для выбранной схемы КРУ 10 кВ предусматривается установка по одному выключателю со стороны автотрансформаторов АТ-1 и АТ-2, а также на всех отходящих линиях. Выбранная схема предусматривает отдельную работу секций. Секционирование шин 10 кВ осуществляется автоматически – секционным выключателем.

Выводы по разделу. Выбраны схемы электрических соединений ОРУ 220 кВ и ОРУ 110 кВ, а также КРУ 10 кВ ПС 220 кВ ПАО «Северсталь» в соответствии с требованиями стандарта организации ПАО «ФСК ЕЭС» [21].

#### 4 Собственные нужды подстанции

На ПС 220 кВ ПАО «Северсталь» в ОРУ 220 кВ и 110 кВ установлено большое число выключателей 220 кВ и 110 кВ, поэтому в соответствии с требованиями стандарта организации ПАО «ФСК ЕЭС» СТО 70238424.29.240ЛЮ.013-2009 выбрана «схема собственных нужд с постоянным оперативным током (схема с независимым источником оперативного тока)» [22], которая показана на рисунке 6.

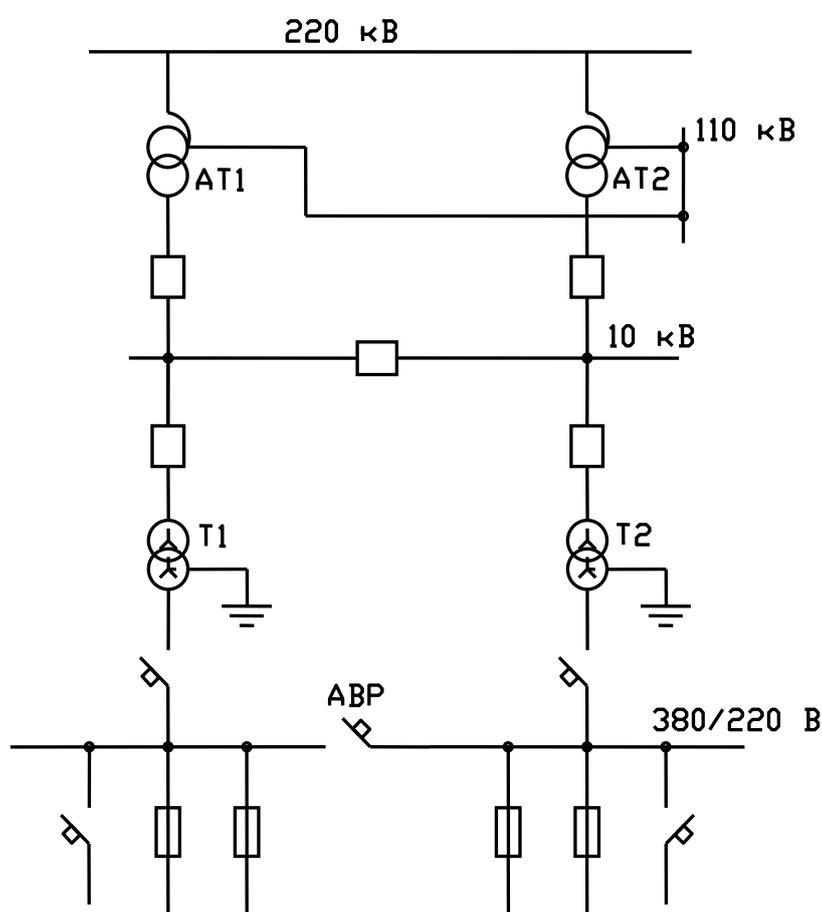


Рисунок 6 – Принятая схема собственных нужд с оперативным постоянным током

С учетом рекомендаций [21], так как на ПС 220 кВ к установке приняты два автотрансформатора мощностью 125 МВА каждый, то для собственных нужд рассматриваем два трансформатора ТСН-400/10 [10]. Выбор данной

мощности обусловлен наличием электрооборудования для питания приводов выключателей 220 кВ и 110 кВ, шкафов обогрева, системой освещения для зданий ЗДУ на территории ПС 220 кВ. Известные уровни зимнего  $P_{зим}$  и летнего максимума  $P_{лет}$  нагрузки трансформаторов собственных нужд ПС 220 кВ приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Уровни зимнего и летнего максимума нагрузки в МВт трансформаторов собственных нужд ПС 220 кВ

Период	ТСН1	ТСН1
$P_{зим}$	311	297
$P_{лет}$	125	103

В таблице 7 приведены технические характеристики принятых к установке трансформаторов собственных нужд ТСН-400/10 [10].

Таблица 7 – Технические характеристики выбранных трансформаторов ТСН-400/10 в системе собственных нужд ПС 220 кВ ПАО «Северсталь»

$S_{ном}, \text{кВА}$	$U_{ном}, \text{кВ}$		$\Delta P_x, \text{кВт}$	$\Delta P_k, \text{Вт}$	$u_k, \%$	$I_x, \%$
	ВН	НН				
400	10	0,4	0,82	4,3	6	1,8

Выводы по разделу. В разделе выполнен выбор схемы собственных нужд, а также трансформаторов собственных нужд в соответствии с требованиями стандарта организации ПАО «ФСК ЕЭС» [22].

## **5 Выбор электрооборудования ОРУ 220 кВ и 110 кВ ПС 220 кВ ПАО «Северсталь»**

Для выбора электрооборудования ОРУ 220 кВ и 110 кВ ПС 220 кВ ПАО «Северсталь» с учетом рекомендаций [7], [18] необходим расчет токов КЗ.

### **5.1 Токи КЗ для выбора электрооборудования ОРУ 220 кВ и 110 кВ ПС 220 кВ ПАО «Северсталь»**

Возможные аварийные электрические режимы подстанции, которые необходимо учесть при расчете токов КЗ:

- аварийное отключение 1 сек. 110 кВ ПС 220 кВ,
- - аварийное отключение 2 сек. 110 кВ ПС 220 кВ,
- аварийное отключение 1 сек. 220 кВ ПС 220 кВ,
- аварийное отключение 2 сек. 220 кВ ПС 220 кВ,
- одновременное аварийное отключение 2-х секций 110 кВ и 220 кВ;
- аварийное отключение АТ-1,
- аварийное отключение АТ-2,
- аварийное отключение воздушной линии 220 кВ «Северсталь-1»,
- аварийное отключение воздушной линии 220 кВ «Северсталь-2»,
- аварийное отключение одной из воздушных линий 110 кВ «Металлургическая-1», «Металлургическая-2», «Металлургическая-3», «Металлургическая-4», «Металлургическая-5», «Череповец-1», «Череповец-2» со стороны ПС 220 кВ ПАО «Северсталь»;
- аварийное отключение одной из воздушных линий 110 кВ «Металлургическая-1», «Металлургическая-2», «Металлургическая-3», «Металлургическая-4», «Металлургическая-5», «Череповец-1», «Череповец-2» со стороны потребителя.

Наиболее тяжелым будет режим отключения одного автотрансформатора АТ-1 или АТ-2 и одной секции сборных шин как со

стороны 220 кВ, так и со стороны 110 кВ. Для этого режима выполнен расчет токов КЗ и составлена схема замещения (рисунок 7).

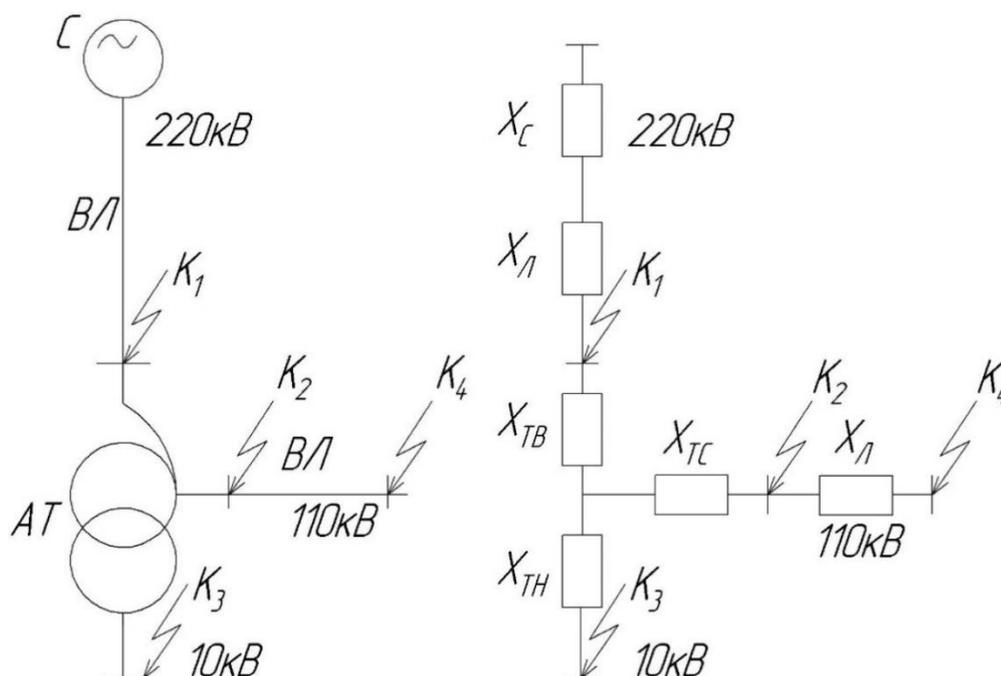


Рисунок 7 – Схема электрических соединений и схема замещения наиболее тяжелого режима ПС 220 кВ для расчета токов КЗ

Расчеты токов КЗ выполнен в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52735-2007 [5] и сведены в таблицу 8.

Таблица 8 – Результаты расчета токов КЗ на ПС 220 кВ ПАО «Северсталь» с учетом подпиток по присоединениям

Наименование узла	$I_{\text{НОМ ОТК}},$ кА	$I_{\text{к}}^{(3)},$ кА	$i_{\text{уд}},$ кА
АТ-1 220 кВ, К1	40	12,32	33,48
АТ-2 220 кВ, К1		12,14	33,12
ВЛ 220 кВ «Северсталь-1»		11,13	31,62
ВЛ 220 кВ «Северсталь-2»		10,98	30,59
АТ-1 110 кВ, К2	40	6,33	15,98
АТ-2 110 кВ, К2		6,21	15,31
ВЛ 110 кВ «Металлургическая-1»		5,89	12,11
ВЛ 110 кВ «Металлургическая-2»		5,93	13,61
ВЛ 110 кВ «Металлургическая-3»		5,93	13,61
ВЛ 110 кВ «Металлургическая-4»		5,12	12,01
ВЛ 110 кВ «Металлургическая-5»	6,03	14,82	

Продолжение таблицы 8

Наименование узла	$I_{\text{НОМ ОТК}},$ кА	$I^{(3)}_{\text{к}},$ кА	$i_{\text{уд}},$ кА
ВЛ 110 кВ «Череповец-1»		6,03	14,82
ВЛ 110 кВ «Череповец-2»		6,03	14,82
АТ-1 10 кВ, КЗ	31,5	29,87	67,18
АТ-2 10 кВ, КЗ		29,87	67,18

## 5.2 Коммутирующее оборудование ОРУ 220 кВ и 110 кВ, КРУ 10 кВ

Для ОРУ 220 кВ выбран элегазовый выключатель ВГБУ-220-40/2000, производитель АО ВО «Электроаппарат» [2]. Для ОРУ 110 кВ выбран элегазовый выключатель ВГБУ-110П-40/2000, производитель АО ВО «Электроаппарат» [3]. Для КРУ 10 кВ выбран вакуумный выключатель ВБЭ-10-31,5/2000 производства НПП «Контакт» [4]. Технологические характеристики выбранных выключателей представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Технологические характеристики выбранных выключателей ВГБУ-220-40/2000 ОРУ 220 кВ, ВГБУ-110П-40/2000, ВБЭ-10-31,5/2000

$I_{\text{НОМ}},$ А	$S_{\text{ОТКЛ}},$ МВА	$I_{\text{НОМ ОТК}},$ кА	$I_{\text{НОМ ВКЛ}},$ кА	$i_{\text{НОМ ВКЛ}},$ кА	$i_{\text{пр.ск}},$ кА	$I_{\text{пр.ск}},$ кА	$I_{\text{тер}}$ / $t_{\text{тер}}$	$t_{\text{ПВ ОТК}},$ с	$t_{\text{СВ}},$ с	$\beta,$ %
ОРУ 220 кВ ВГБУ-220-40/2000										
2000	16000	40	40	102	102	40	40/3	0,06	0,035	45
ОРУ 110 кВ ВГБУ-110П-40/2000										
2000	8000	40	40	102	102	40	40/3	0,05	0,005	45
КРУ 10 кВ ВБЭ-10-31,5/2000										
2000	550	31,5	31,5	102	102	31,5	31,5/3	0,07	0,04	45

Выбранные выключатели для ОРУ 220 кВ и ОРУ 110 кВ, КРУ 10 кВ проверены по критериям [13], приведенными в таблице 10.

В соответствии с результатами расчета токов КЗ установлено, что в ОРУ 220 кВ и 110 кВ, КРУ 10 кВ отключающая способность и термическая

стойкость выключателей ВГБУ-220-40/2000 ОРУ 220 кВ, ВГБУ-110П-40/2000, ВБЭ-10-31,5/2000 соответствует расчетным значениям тока КЗ.

Таблица 10 – Критерии проверки выключателей ВГБУ-220-40/2000, ВГБУ-110П-40/2000, ВБЭ-10-31,5/2000

Критерий выбора	Тип выключателя		
	ВГБУ-220-40/2000	ВГБУ-110П-40/2000	ВБЭ-10-31,5/2000
$U_{\text{НОМ ВЫКЛ}}$ , кВ	220	110	10
$I_{\text{НОМ ВЫКЛ}}$ , кА	2000	2000	2000
$I_{\text{ПТ}} \leq I_{\text{ОТК.НОМ}}$ , кА	$12,32 \leq 40$	$6,33 \leq 40$	$29,87 \leq 31,5$
$I_{\text{П.о}} \leq I_{\text{ПО.С}}$ , кА	$12,32 \leq 40$	$6,33 \leq 40$	$29,87 \leq 31,5$
$i_{\text{а.т}} \leq i_{\text{а.НОМ}}$ , кА	$3,57 \leq 11,31$	$2,25 \leq 11,31$	$4,57 \leq 9,12$
$V_{\text{К}} \leq V_{\text{НОМ}}$ , кА <sup>2</sup> · с	$17,37 \leq 4800$	$4,25 \leq 4800$	$16,42 \leq 2976,75$

Аналогично выбраны разъединители для ОРУ 220 кВ и 110 кВ. Для ОРУ 220 кВ выбран разъединитель РНДЗ-220/1000 У1, для ОРУ 110 кВ – РНДЗ-110/1000 У1 производства ЗАО «ЗЭТО» [9]. Технологические характеристики выбранных разъединителей ОРУ 220 кВ и ОРУ 110 кВ, представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Технологические характеристики выбранных разъединителей РНДЗ-220/1000 У1, РНДЗ-110/1000 У1

$U_{\text{НОМ}}$ , кВ	$I_{\text{НОМ}}$ , А	$i_{\text{пр.ск}}$ , кА	$I_{\text{Т}}/t_{\text{Т}}/t_{\text{Н}}$ , кА/с
Разъединители ОРУ 220 кВ РНДЗ-220/1000 У1			
220	1000	100	40/3/1
Разъединители ОРУ 110 кВ РНДЗ-110/1000 У1			
110	1000	80	31,5/3/1

Выбранные разъединители для ОРУ 220 кВ и ОРУ 110 кВ проверены по критериям [13], приведенными в таблице 12.

Таблица 12 – Критерии проверки разъединителей РНДЗ-220/1000 У1, РНДЗ-110/1000 У1

Критерий выбора	Тип разъединителя	
	РНДЗ-220/1000 У1	РНДЗ-110/1000 У1
$U_{НОМ\ ВЫКЛ}, \text{кВ}$	220	110
$I_{НОМ\ ВЫКЛ}, \text{кА}$	1000	1000
$I_{П,о} \leq I_{П,с}, \text{кА}$	$12,32 \leq 100$	$6,33 \leq 80$
$V_K \leq V_{НОМ}, \text{кА}^2 \cdot \text{с}$	$17,37 \leq 4800$	$4,25 \leq 4800$

### 5.3 Измерительные трансформаторы тока и напряжения ОРУ 220 кВ и 110 кВ, КРУ 10 кВ

Технологические характеристики выбранных измерительных трансформаторов тока представлены в таблице 13 [20].

Таблица 13 – Технологические характеристики выбранных измерительных трансформаторов тока ОРУ 220 кВ и 110 кВ, КРУ 10 кВ

Узел	$I_{НОМ1}, \text{А}$	$I_{НОМ2}, \text{А}$	$I_{тер}, \text{кА}$	$t_{тер}, \text{с}$	$S_{НОМ2}, \text{ВА}$	$t_{ПР}$	$t_{окр}, ^\circ\text{C}$
ОРУ 220 кВ	ТВ-220- 400/1 У3						
	400	1	25	3	15	25	(-45 ... + 40)
Ввод 220 кВ АТ	ТВТ220-1-400/1 У3						
	400	1	25	3	15	25	(-45 ... + 40)
ОРУ 110 кВ	ТВ-110- 600/1 У3						
	600	1	25	3	40	23	(-45 ... + 40)
Ввод 110 кВ АТ	ТВТ110-1-600/1 У3						
	600	1	25	3	40	23	(-45 ... + 40)
КРУ 10 кВ	ТЛО-10-600/5 У3						
	600	5	25	3	63	-	(-45 ... + 40)
Ввод 10 кВ АТ	ТВТ10-1-5000/5 У3						
	5000	5	25	3	63	-	(-45 ... + 40)
ТСН 10 кВ	ТЛО-10-50/5 У3						
	50	6	25	3	10	-	(-45 ... + 40)

Выбранные измерительные трансформаторы тока для ОРУ 220 кВ и ОРУ 110 кВ, КРУ 10 кВ проверены по критериям [13], приведенными в таблице 14.

В соответствии с результатами расчета токов КЗ установлено, что в ОРУ 220 кВ и 110 кВ, КРУ 10 кВ термическая стойкость, вторичная нагрузка измерительных трансформаторов тока ТВ-220- 400/1 УЗ, ТВТ220-1-400/1 УЗ, ТВ-110- 600/1 УЗ, ТВТ110-1-600/1 УЗ, ТЛО-10-600/5 УЗ, ТВТ10-1-5000/5 УЗ и ТЛО-10-50/5 УЗ соответствует расчетным значениям тока КЗ.

Таблица 14 – Критерии проверки трансформаторов тока ТВ-220- 400/1 УЗ, ТВ-110- 600/1 УЗ, ТЛО-10-600/5 УЗ

Критерий выбора	Тип трансформатора тока		
	ТВ-220- 400/1 УЗ	ТВ-110- 600/1 УЗ	ТЛО-10-600/5 УЗ
$U_{НОМ\text{ТТ}}, \text{кВ}$	220	110	10
$I_{НОМ1\text{ТТ}}, \text{А}$	400	600	600
$B_K \leq B_{НОМ}, \text{кА}^2 \cdot \text{с}$	$17,37 \leq 4800$	$4,25 \leq 4800$	$16,42 \leq 2976,75$
$S_{ПР} \leq S_{НОМ2}, \text{кА}$	$7,98 \leq 15$	$28,37 \leq 40$	$42,14 \leq 63$

Технологические характеристики выбранных измерительных трансформаторов напряжения производства группы компаний АВВ [8] представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Технологические характеристики выбранных измерительных трансформаторов напряжения ОРУ 220 кВ и 110 кВ, КРУ 10 кВ

$U_{НОМ1}, \text{кВ}$	$U_{НОМ2}, \text{В}$	$S_{НОМ2}, \text{ВА}$	$S_{ПР}, \text{ВА}$
СРВ 245У1			
220	$100/\sqrt{3}$	150	3200
СРВ 123У1			
110	$100/\sqrt{3}$	150	3200
ЗНОЛП 10 У2 123У1			
10	$100/\sqrt{3}$	150	3200

#### 5.4 ОПН для ОРУ 220 кВ и ОРУ 110 кВ

«Ограничитель перенапряжений нелинейный (ОПН) является одним из основных элементов подстанции, обеспечивающим защиту оборудования распределительного устройства (РУ) и линий от коммутационных и грозовых перенапряжений» [14]. Выбор ОПН для ОРУ 220 кВ и ОРУ 110 кВ выбран на

основании «Методических указаний по применению ограничителей перенапряжений нелинейных в электрических сетях 110-750 кВ» [14]. Технологические характеристики выбранных ОПН ЗАО «ЗЭТО» представлены в таблице 16 [19].

Таблица 16 – Технологические характеристики выбранных ОПН ОРУ 220 кВ и 110 кВ

$U_c$ , кВ	$U_{ном1}$ , кВ	$I_{ном\ разр}$ , кА	$U_{ост}$ , кВ (при $I_{гр} = 500$ А)	$I_{имп}$ , А
ОПН-П1-220 УХЛ1				
220	154	10	378	20
ОПНН-220 УХЛ1 (для установки в нейтрали АТ)				
220	114	10	226	450
ОПН-П1-110 УХЛ1				
110	73	10	142	2

Выводы по разделу. В разделе для расчета токов КЗ рассмотрены возможные аварийные режимы на ПС 220 кВ при отключении одного из АТ-1 или АТ-2, а также одной отходящей воздушной линии 220 кВ или 110 кВ. расчет токов КЗ для наиболее тяжелого аварийного режима позволил сделать выбор коммутирующего оборудования, измерительных трансформаторов тока и напряжения, а также ОПН для ОРУ 220 кВ и 110 кВ, КРУ 10 кВ ПС 220 кВ ПАО «Северсталь».

## **6 Расчет релейной защиты питающей сети 220 кВ ПС 220 кВ ПАО «Северсталь»**

Рассмотрим расчет дистанционной защиты воздушных линий 220 кВ «Северсталь-1» и «Северсталь-2». Расчет дистанционной защиты ВЛ 220 кВ выполнен согласно [23]. Для реализации дистанционной защиты линий 220 кВ выбираем шкаф типа ШЭ2607 011021 ООО НПП «ЭКРА» [27].

«Шкаф типа ШЭ2607 011021 предназначен для защиты воздушной линии 110-220 кВ и управления линейным выключателем 110-220 кВ.

Шкаф состоит из двух комплектов с возможностью независимого обслуживания. Первый комплект реализует функции автоматик управления выключателем (АУВ), устройство резервирования отказа выключателя (УРОВ), автоматическое повторное включение (АПВ) и содержит пять ступеней дистанционной защиты (ДЗ) от междуфазных замыканий, ступень ДЗ от земляных замыканий, шесть ступеней токовой направленной защиты нулевой последовательности (ТНЗНП), токовую отсечку (ТО), две ступени максимальной токовой защиты (МТЗ), автоматику разгрузки при перегрузке по току (АРПТ).

Второй комплект реализует функцию УРОВ и содержит пять ступеней дистанционной защиты от междуфазных замыканий, ступень ДЗ от земляных замыканий, шесть ступеней токовой направленной защиты нулевой последовательности, токовую отсечку, две ступени максимальной токовой защиты, АРПТ, защиту от неполнофазного режима (ЗНФР)» [27].

Двойной комплект шкафов ШЭ2607 011021 ООО НПП «ЭКРА» [27] обладает несомненным преимуществом по возможности независимого обслуживания по сравнению с терминалами компании АВВ [31], обеспечивает интеграцию с резервными защитами, а также возможность телеотключения и телеускорения.

## 6.1 Определение параметров схемы замещения исследуемой сети 220 кВ и 110 кВ

Для ПС 220 кВ ПАО «Северсталь» условиями технического присоединения задано (таблица 2):

$$S_{\text{ЭС1}} = 2000 \text{ МВА}, S_{\text{ЭС2}} = 3000 \text{ МВА}.$$

Сопротивления системы ЭС-1 и ЭС-2 (рисунок 1):

$$X_{C1} = X_{C1(\text{НОМ})} \cdot \frac{U_{\text{СНОМ}}^2}{S_{\text{ЭС1}}}, \quad (2)$$

$$X_{C2} = X_{C2(\text{НОМ})} \cdot \frac{U_{\text{СНОМ}}^2}{S_{\text{ЭС2}}}, \quad (3)$$

где  $U_{\text{СНОМ}}$  – номинальное напряжение сети 220 кВ;

$X_{C1(\text{НОМ})}, X_{C2(\text{НОМ})}$  – сопротивления ЭС-1 и ЭС-2 в номинальном режиме, принимаем  $X_{C1(\text{НОМ})} = 1, X_{C2(\text{НОМ})} = 1,2$ .

$$X_{C1} = 1,0 \cdot \frac{230^2}{2000} = 26,45 \text{ Ом}, X_{C2} = 1,2 \cdot \frac{230^2}{3000} = 21,16 \text{ Ом}.$$

Определение сопротивлений ВЛ 220 кВ «Северсталь-1» и «Северсталь-2»:

$$X_L = X_{\text{уд}} L, \quad (4)$$

где  $X_{\text{уд}}$  – удельное сопротивление ВЛ 220 кВ,  $X_{\text{уд}} = 0,429$  [1].

$$X_{L1} = 0,429 \cdot 50 = 21,45 \text{ Ом}, X_{L2} = 0,429 \cdot 40 = 17,16 \text{ Ом}.$$

Определение сопротивлений АТ-1 и АТ-2. Для автотрансформаторов типа АДЦТН-125000/220/110 из [10]

$$U_{KBH-CH} = 11 \%, U_{KBH-HH} = 45 \%, U_{KCH-HH} = 28 \%, \Delta U_{РПН} = 12\% .$$

В этом случае можно определить по рассчитанным по формулам (5) – (7) значения  $U_K$  и минимальное и максимальное значения сопротивлений с учетом РПН по формуле (8):

$$U_{KB} = 0,5 \cdot (U_{KBH-CH} + U_{KBH-HH} - U_{KCH-HH}), \quad (5)$$

$$U_{KC} = 0,5 \cdot (U_{KBH-CH} + U_{KCH-HH} - U_{KBH-HH}), \quad (6)$$

$$U_{KH} = 0,5 \cdot (U_{KBH-HH} + U_{KCH-HH} - U_{KBH-CH}), \quad (7)$$

$$U_{KB} = 14 \%, U_{KC} = 0, U_{KH} = 31 \%,$$

$$X_{TB} = \frac{U_{KB}}{100} \cdot \frac{U_{CHOM}^2}{S_{THOM}}, \quad (8)$$

где  $S_{THOM}$  – номинальная мощность автотрансформатора.

$$X_{TB} = 59,25 \text{ Ом}, X_{TBmin} = 0,88^2 \cdot 59,25 = 45,88 \text{ Ом}, X_{TBmax} = 1,12^2 \cdot 59,25 = 74,32 \text{ Ом}.$$

## 6.2 Расчет дистанционной защиты ВЛ 220 кВ «Северсталь-1» «Северсталь-2»

Защита ДЗ1. Первая ступень – защита от КЗ на защищаемом участке.  
Время срабатывания первой ступени ДЗ

$$t'_{C31} = t'_{C32} = t'_{C33} = t'_{C34} \approx 0 \text{ с} .$$

Сопротивления срабатывания первой ступени дистанционной защиты ВЛ 220 кВ «Северсталь-1» и «Северсталь-2» определяются по [6]:

$$Z'_{C3} = K_{OTC} \cdot X_L, \quad (9)$$

где  $K_{OTC}$  – коэффициент отстройки ДЗ,  $K_{OTC} = 0,87$  [6].

$$Z'_{C31} = 18,66 \text{ Ом}, Z'_{C32} = 18,66 \text{ Ом}, Z'_{C33} = 14,93 \text{ Ом}, Z'_{C34} = 14,93 \text{ Ом}.$$

Вторая ступень – защита конца линии и шин приемной подстанции, резервирование отказа первой ступени. Время срабатывания второй ступени ДЗ:

$$t''_{C31} = t'_{CM} + t_{УРОВ} + \Delta t, \quad (10)$$

где  $t_{УРОВ}$  – время срабатывания УРОВ,  $t_{УРОВ} = 0,5$  с [16].

$$t''_{C31} = 0,3 + 0,5 = 0,8 \text{ с}.$$

Время срабатывания второй ступени защит принимаем равным:

$$t''_{C31} = t''_{C32} = t''_{C33} = t''_{C34} = 0,8 \text{ с}.$$

Отстройка от КЗ в конце зоны действия первой ступени ДЗ ВЛ 220 кВ «Северсталь-1» с учетом данных из (9) и (10) определяется по формуле:

$$Z''_{C31} = K_{OTC} \cdot \left( X_{L1} + \frac{K'_{OTC} \cdot Z'_{C33}}{K_{ТЛ1.МАХ}} \right), \quad (11)$$

где  $K_{ТЛ1.МАХ}$  – коэффициент токораспределения ВЛ 220 кВ «Северсталь-1».

$$Z''_{C31} = 0,87 \cdot (21,45 + \frac{0,9 \cdot 14,93}{1}) = 30,35 \text{ Ом} .$$

Отстройка от КЗ на шинах трансформатора СН.

В режиме ВЛ 220 кВ «Северсталь-2» отключена:

$$Z''_{C31} = K_{OTC} \cdot (X_{L1} + \frac{X_{T\min}}{K_{AT1.MAX}}), \quad (12)$$

где  $K_{AT1.MAX}$  – коэффициент токораспределения АТ-1.

$$Z''_{C31} = 0,87 \cdot (21,45 + \frac{45,88}{1}) = 58,58 \text{ Ом} .$$

В режиме ВЛ 220 кВ «Северсталь-2» включена. В этом случае  $K_{AT1.MAX} < 1$ , следовательно, для  $Z''_{C31}$  выбираем минимальное сопротивление:

$$\begin{aligned} Z''_{C31} &= 30,35 \text{ Ом} \\ Z''_{C31} &= 58,58 \text{ Ом} \end{aligned} \Rightarrow Z''_{C31} = 30,35 \text{ Ом} .$$

Проверим чувствительность ДЗ1 с учетом полученных расчетных данных:

$$K''_{ч.MIN1} = \frac{Z''_{C31}}{X_{L1}} . \quad (13)$$

$$K''_{ч.MIN1} = \frac{30,35}{21,45} = 1,41 > 1,25 .$$

Защита ДЗ2. Отстройка от КЗ в конце зоны действия первой ступени защиты для ВЛ 220 кВ «Северсталь-2» определяется аналогично выражению (12), меняя параметры линии L1 на L2:

$$Z''_{C32} = 0,87 \cdot (17,16 + \frac{0,9 \cdot 18,66}{1}) = 29,54 \text{ Ом}.$$

Отстройка от КЗ на шинах трансформатора СН.

В режиме ВЛ 220 кВ «Северсталь-2» отключена, аналогично по выражению (12), меняя параметры линии L1 на L2:

$$Z''_{C32} = 0,87 \cdot (17,16 + \frac{45,88}{1}) = 54,85 \text{ Ом}.$$

В режиме ВЛ 220 кВ «Северсталь-2» включена. В этом случае  $K_{AT2,MAX} < 1$  следовательно, для  $Z''_{C31}$  выбираем минимальное сопротивление:

$$\begin{aligned} Z''_{C34} &= 29,54 \text{ Ом} \\ Z''_{C34} &= 54,85 \text{ Ом} \end{aligned} \Rightarrow Z''_{C34} = 29,54 \text{ Ом}.$$

Проверим чувствительность ДЗ2 по формуле (13):

$$K''_{чMIN2} = \frac{29,54}{16,16} = 1,82 > 1,25 .$$

Назначение третьей ступени ДЗ – ближнее и дальнее резервирование (отказы защит и выключателей смежных участков) [26]. Для третьей ступени необходимо определить угол линии, а также фазу вектора нагрузки. Принимаем  $\cos \varphi_H = 0,85 \Rightarrow \varphi_H = 37,8$ .

Фаза вектора сопротивления срабатывания защиты:

$$\varphi_{cp} = \varphi_H + \varphi_{3АП} < \gamma, \quad (14)$$

где  $\gamma$  – угол наклона линии.

$$\varphi_{cp} = 37,8 + 12 = 49,8 < \gamma = 50.$$

Для расчета сопротивлений срабатывания защит для третьей ступени принимаем  $K_{q1}^{III} = 1,2$ .

Защита ДЗ1. Режим 1. КЗ на шинах внешней энергосистемы ЭС2 в конце ВЛ 220 кВ «Северсталь-2», ремонтная перемычка между АТ-1 и АТ-2 отключена. Схема замещения сети 220 кВ ПС 220 кВ ПАО «Северсталь» для режима 1 представлена на рисунке 8.

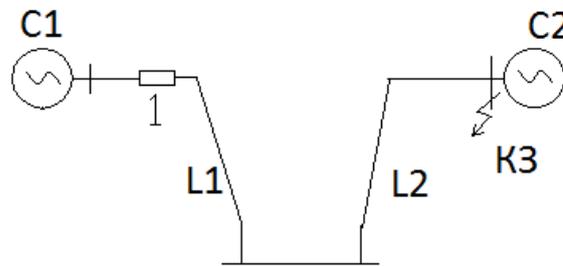


Рисунок 8 – Схема замещения сети 220 кВ для режима 1 ДЗ1

Сопротивление в точке КЗ для сети 220 кВ определяется суммой сопротивлений линий Л1 и Л2:

$$Z_{3MAX} = X_{L1} + X_{L2}. \quad (15)$$

$$Z_{3MAX} = 21,45 + 17,16 = 38,61 \text{ Ом}.$$

Для режима 1 сопротивление срабатывания защиты третьей ступени:

$$Z_{сз1}^{III} = K_{q1}^{III} \cdot Z_{3MAX}, \quad (16)$$

где  $K_{q1}^{III}$  - чувствительность ДЗ1.

$$Z_{C31}^{III} = 1,2 \cdot 38,61 = 46,33 \text{ Ом}.$$

Режим 2. КЗ на шинах 110 кВ АТ-2, АТ-1 отключен, ремонтная перемычка между АТ-1 и АТ-2 отключена. Схема замещения сети для режима 2 представлена на рисунке 9.

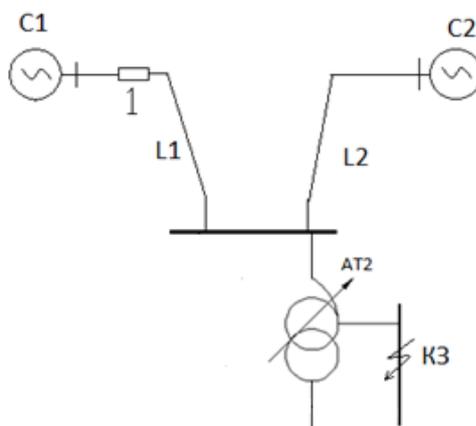


Рисунок 9 – Схема замещения сети 220 кВ и 110 кВ для режима 2 ДЗ1

Сопротивление до места КЗ для сети 110 кВ определяется через распределение токов по рисунку 9:

$$K_{T.MIN} = \frac{(X_{C2} + X_{L2}) \cdot 0,5}{X_{C1} + X_{L1} + X_{C2} + X_{L2}}. \quad (17)$$

$$K_{T.MIN} = \frac{(21,16 + 17,16) \cdot 0,5}{26,45 + 21,45 + 21,16 + 17,16} = 0,222.$$

В этом случае для максимального режима:

$$Z_{3MAX} = Z_{L1} + \frac{Z_{TBMAX}}{K_{T.MIN}} = . \quad (18)$$

$$Z_{3MAX} = 21,45 + \frac{74,32}{0,222} = 356,23 \text{ Ом}.$$

Для режима 2 сопротивление срабатывания ДЗ1 третьей ступени по формуле (16):

$$Z_{сз1}^{III} = 1,2 \cdot 356,23 = 427,476 \text{ Ом} .$$

Выбираем меньшее значение сопротивления  $Z_{сз1}^{III} = 46,33 \text{ Ом}$ .

Защита ДЗ2. Режим 1. КЗ на шинах внешней энергосистемы ЭС2 в конце ВЛ 220 кВ «Северсталь-2», ремонтная перемычка между АТ-1 и АТ-2 включена. Схема замещения сети 220 кВ ПС 220 кВ ПАО «Северсталь» для режима 1 защиты ДЗ2 представлена на рисунке 10.

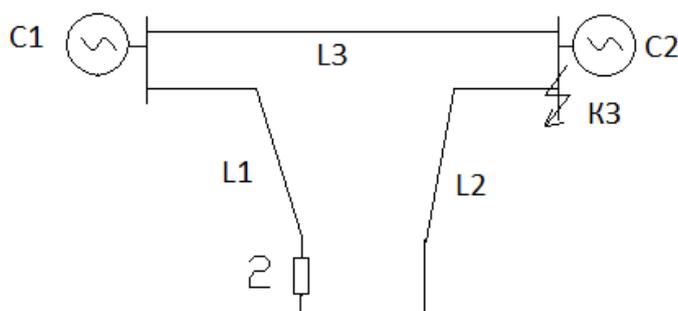


Рисунок 10 – Схема замещения сети 220 кВ для режима 1 защиты ДЗ2

В режиме 1 возможны следующие варианты.

Вариант 1 – при условии, что ремонтная перемычка включена, линии Л1 и Л2 включены, ток КЗ протекает по через Л2 и через ремонтную перемычку. Третья ступень ДЗ2 не среагирует на КЗ.

Вариант 2 – при условии, что ремонтная перемычка включена, линия Л1 включена, а Л2 отключена, третья ступень ДЗ2 так же не среагирует на КЗ.

Защита ДЗ3. Режим 1. КЗ на шинах внешней энергосистемы ЭС2 в конце ВЛ 220 кВ «Северсталь-1», ремонтная перемычка между АТ-1 и АТ-2

включена. Схема замещения сети 220 кВ ПС 220 кВ ПАО «Северсталь» для режима 1 защиты ДЗЗ представлена на рисунке 11.

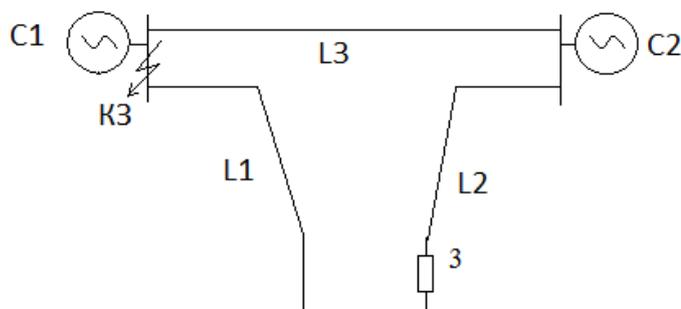


Рисунок 11 – Схема замещения сети 220 кВ для режима 1 защиты ДЗЗ

В режиме 1 возможны следующие варианты.

Вариант 1 – при условии, что ремонтная перемычка включена, линии L1 и L2 включены, ток КЗ протекает по через L1 и через ремонтную перемычку. Третья ступень ДЗЗ не среагирует на КЗ.

Вариант 2 – при условии, что ремонтная перемычка включена, линия L1 отключена, а L2 включена, третья ступень ДЗЗ так же не среагирует на КЗ.

Для защит ДЗ2 и ДЗ3 из-за невозможности отстроить третью ступень защиты необходимо использовать резервные защиты ЭС1 и ЭС2.

Защита ДЗ4. В режиме 1 возможны следующие варианты.

Вариант 1 – при условии, что ремонтная перемычка отключена, линии L1 и L2 включены, ток КЗ протекает по через L1. Схема замещения сети 220 кВ ПС 220 кВ ПАО «Северсталь» для режима 1 защиты ДЗ4 представлена на рисунке 12.

Сопротивление в точке КЗ для режима 1 ДЗ4 определяется суммой сопротивлений линий L1 и L2 по выражению (15):

$$Z_{3MAX} = 21,45 + 17,16 = 38,61 \text{ Ом}.$$

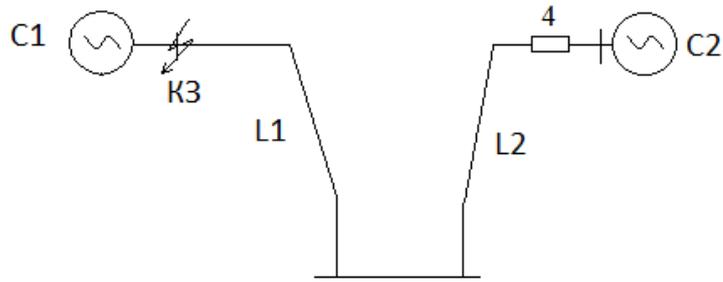


Рисунок 12 – Схема замещения сети 220 кВ для режима 1 (вариант 1) защиты ДЗ4

Для режима 1 сопротивление срабатывания ДЗ4 третьей ступени по формуле (16) с учетом параметров данной ступени:

$$Z_{C34}^{III} = 1,2 \cdot 38,61 = 46,33 \text{ Ом} .$$

Вариант 2 – КЗ на шинах 110 кВ АТ-2, АТ-1 отключен, ремонтная перемычка между АТ-1 и АТ-2 отключена, линии L1 и L2 включены. Схема замещения сети 220 кВ и 110 кВ ПС 220 кВ ПАО «Северсталь» для варианта 2 ДЗ4 представлена на рисунке 13.

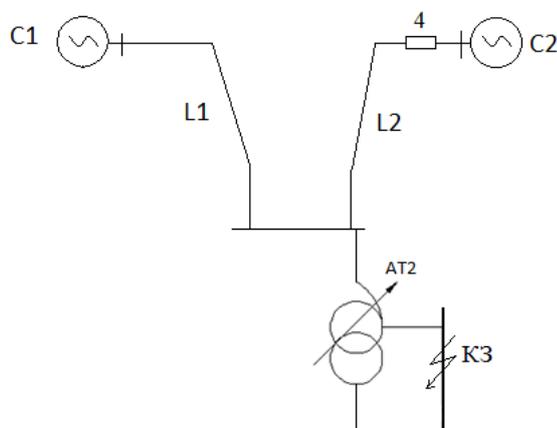


Рисунок 13 – Схема замещения сети 220 кВ и 110 кВ для режима 1 (вариант 2) защиты ДЗ4

Сопротивление до места КЗ для сети 110 кВ определяется через распределение токов по рисунку 13 из формулы (17):

$$K_{T.MIN} = \frac{(26,45 + 21,45) \cdot 0,5}{26,45 + 21,45 + 21,16 + 17,16} = 0,28.$$

В этом случае для максимального режима по формуле (18):

$$Z_{3MAX} = 17,16 + \frac{74,32}{0,28} = 282,59 \text{ Ом}.$$

Для режима 1, вариант 2 сопротивление срабатывания ДЗ4 третьей ступени по формуле (16) с учетом параметров данной ступени:

$$Z_{C34}^{III} = 1,2 \cdot 282,59 = 339,1 \text{ Ом}.$$

Из расчетных значений выбираем меньшее значение сопротивления  $Z_{C34}^{III} = 46,33 \text{ Ом}.$

Защита ДЗ5. Режим 1. Линия L1 включена, линия L2 отключена, ремонтная перемычка между АТ-1 и АТ-2 включена. КЗ в конце линии L1. Схема замещения сети 220 кВ ПС 220 кВ ПАО «Северсталь» для режима 1 ДЗ5 представлена на рисунке 14. Из рисунка 14 следует соотношение токов:

$$K_{T.MIN} = \frac{X_{C1}}{X_{C1} + X_{L3} + X_{C2}}. \quad (19)$$

$$K_{T.MIN} = \frac{26,45}{26,45 + 25,74 + 21,16} = 0,361$$

В этом случае для максимального режима по формуле (18):

$$Z_{3MAX} = 25,74 + \frac{21,45}{0,361} = 84,33 \text{ Ом}.$$

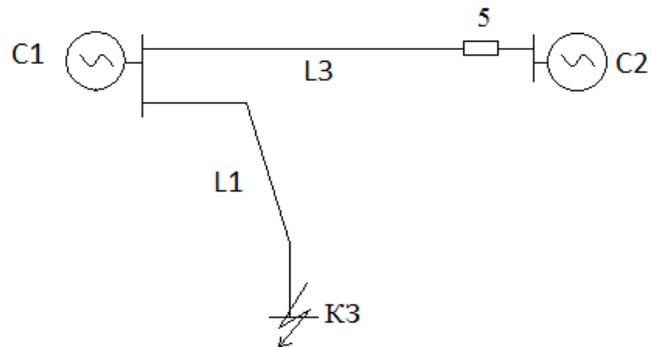


Рисунок 14 – Схема замещения сети 220 кВ для режима 1 защиты ДЗ5

Для режима 1 сопротивление срабатывания ДЗ5 третьей ступени по формуле (16) с учетом параметров данной ступени:

$$Z_{C35}^{III} = 1,2 \cdot 84,33 = 101,2 \text{ Ом}.$$

Защита ДЗ6. Режим 1. В этом режиме наоборот линия L1 отключена, линия L2 включена, ремонтная перемычка между АТ-1 и АТ-2 включена. КЗ в конце линии L2. Схема замещения сети 220 кВ ПС 220 кВ ПАО «Северсталь» для режима 1 ДЗ6 представлена на рисунке 15. Из рисунка 15 соотношение токов определяется с учетом формулы (19):

$$K_{T.MIN} = \frac{21,16}{21,16 + 25,74 + 26,45} = 0,288$$

Для максимального режима по формуле (18):

$$Z_{3MAX} = 25,74 + \frac{17,16}{0,288} = 85,32 \text{ Ом}.$$

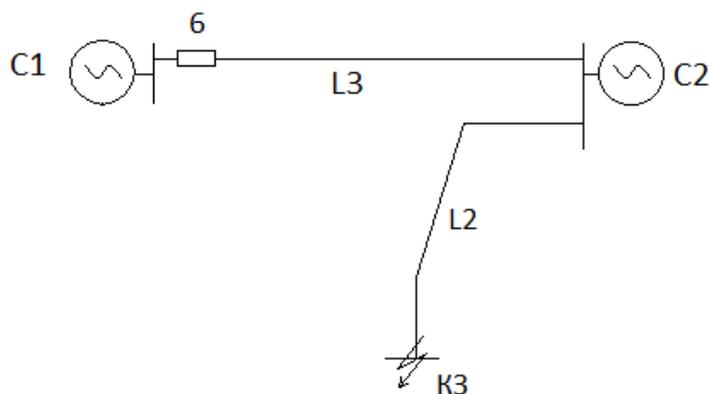


Рисунок 15 – Схема замещения сети 220 кВ для режима 1 защиты ДЗ5

Для режима 1 сопротивление срабатывания ДЗ6 третьей ступени по формуле (16) с учетом параметров данной ступени:

$$Z_{C36}^{III} = 1,2 \cdot 85,32 = 102,384 \text{ Ом}.$$

Выбираем большее значение сопротивления  $Z_{C3max}^{III} = 102,384 \text{ Ом}$ .

Расчет времени срабатывания третьей ступени защит ДЗ1-ДЗ6 выполняется по формуле (20) по известным временам ступеней N и M для защит i и j с учетом интервала запаздывания  $\Delta t = 0,5$ :

$$t_{C3i}^N = t_{C3j}^M + \Delta t, \quad (20)$$

$$t_{C32}^{III} = 0,8 + 0,5 = 1,3 \text{ с},$$

$$t_{C33}^{III} = 0,8 + 0,5 = 1,3 \text{ с},$$

$$t_{C31}^{III} = 1,3 + 0,5 = 1,8 \text{ с},$$

$$t_{C34}^{III} = 1,3 + 0,5 = 1,8 \text{ с},$$

$$t_{C35}^{III} = 1,8 + 0,5 = 2,3 \text{ с},$$

$$t_{C36}^{III} = 1,8 + 0,5 = 2,3 \text{ с}.$$

Определение сопротивления срабатывания реле первой, второй и третьей ступени защит ДЗ1-ДЗ6 выполняется по формуле (21):

$$Z_{C.P.} = \frac{K_I}{K_U} \cdot Z_{C3}, \quad (21)$$

где  $K_I$  и  $K_U$  – коэффициенты трансформации ТТ и ТН.

$$Z_{C.P.} = \frac{400/1}{\frac{220000/\sqrt{3}}{100/\sqrt{3}}} \cdot Z_{C3} = 0,182 \cdot Z_{C3} ,$$

$$Z'_{CP1} = 0,182 \cdot 18,66 = 3,4 \text{ Ом} ,$$

$$Z'_{CP2} = 0,182 \cdot 18,66 = 3,4 \text{ Ом} ,$$

$$Z'_{CP3} = 0,182 \cdot 14,93 = 2,7 \text{ Ом} ,$$

$$Z'_{CP4} = 0,182 \cdot 14,93 = 2,7 \text{ Ом} ,$$

$$Z'_{CP5} = 0,182 \cdot 22,4 = 4,1 \text{ Ом} ,$$

$$Z'_{CP6} = 0,182 \cdot 22,4 = 4,07 \text{ Ом} ,$$

$$Z''_{CP1} = 0,182 \cdot 30,35 = 5,52 \text{ Ом} ,$$

$$Z''_{CP2} = 0,182 \cdot 36,2 = 6,59 \text{ Ом} ,$$

$$Z''_{CP3} = 0,182 \cdot 32,47 = 5,9 \text{ Ом} ,$$

$$Z''_{CP4} = 0,182 \cdot 29,54 = 5,38 \text{ Ом} ,$$

$$Z''_{CP5} = 0,182 \cdot 37,0 = 6,73 \text{ Ом} ,$$

$$Z''_{CP6} = 0,182 \cdot 34,08 = 5,66 \text{ Ом} ,)$$

$$Z'''_{CP1} = 0,182 \cdot 46,33 = 8,43 \text{ Ом} ,$$

$$Z'''_{CP4} = 0,182 \cdot 46,33 = 8,33 \text{ Ом} ,$$

$$Z_{CP5}^{III} = 0,182 \cdot 101,2 = 18,41 \text{ Ом},$$

$$Z_{CP6}^{III} = 0,182 \cdot 102,384 = 18,63 \text{ Ом}.$$

Расчетные значения времени срабатывания и сопротивления срабатывания ДЗ1-ДЗ6 на воздушных линиях 220 кВ «Северсталь-1» и «Северсталь-2» ПС 220 кВ ПАО «Северсталь» сведены в таблицу 17.

Таблица 17 – Расчетные значения времени срабатывания и сопротивления срабатывания ДЗ1-ДЗ6 на воздушных линиях 220 кВ

Ступень ДЗ		ДЗ1	ДЗ2	ДЗ3	ДЗ4	ДЗ5	ДЗ6
I ступень	$Z_{CP}, \text{ Ом}$	3,4	3,4	2,7	2,7	4,1	4,1
	$t_{C3}, \text{ с}$	0	0	0	0	0	0
II ступень	$Z_{CP}, \text{ Ом}$	5,52	6,59	5,9	5,38	6,73	5,66
	$t_{C3}, \text{ с}$	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
III ступень	$Z_{CP}, \text{ Ом}$	8,43	-	-	8,43	18,41	18,63
	$t_{C3}, \text{ с}$	1,8	-	-	1,8	2,3	2,3

### 6.3 Характеристика срабатывания реле сопротивлений первой, второй и третьей ступеней ДЗ воздушных линий 220 кВ «Северсталь-1» и «Северсталь-2» ПС 220 кВ

Построим характеристику срабатывания реле сопротивлений первой, второй и третьей ступеней ДЗ воздушных линий 220 кВ «Северсталь-1» и «Северсталь-2» ПС 220 кВ, характеристика приведена на рисунке 16.

Для построения характеристики на рисунке 16 исходя из стандарта организации ПАО «ФСК ЕЭС» [24] были приняты заводские настройки шкафа ШЭ2607 011021:

- «угол наклона характеристик ИО I ст (II ст, III ст, V ст)  $\varphi_1 = 75^\circ$ ;
- угол наклона верхней части характеристики исполнительного органа ИО ( $\varphi_4$ )=  $0^\circ$ ;

- угол наклона левой части характеристики исполнительного органа ИО  $(\varphi_3)_{\text{накл(лев)}} = 115^\circ$ ;
- угол наклона нижней части характеристики исполнительного органа ИО  $(\varphi_2)_{\text{накл(нижн)}} = -15^\circ$  [24].

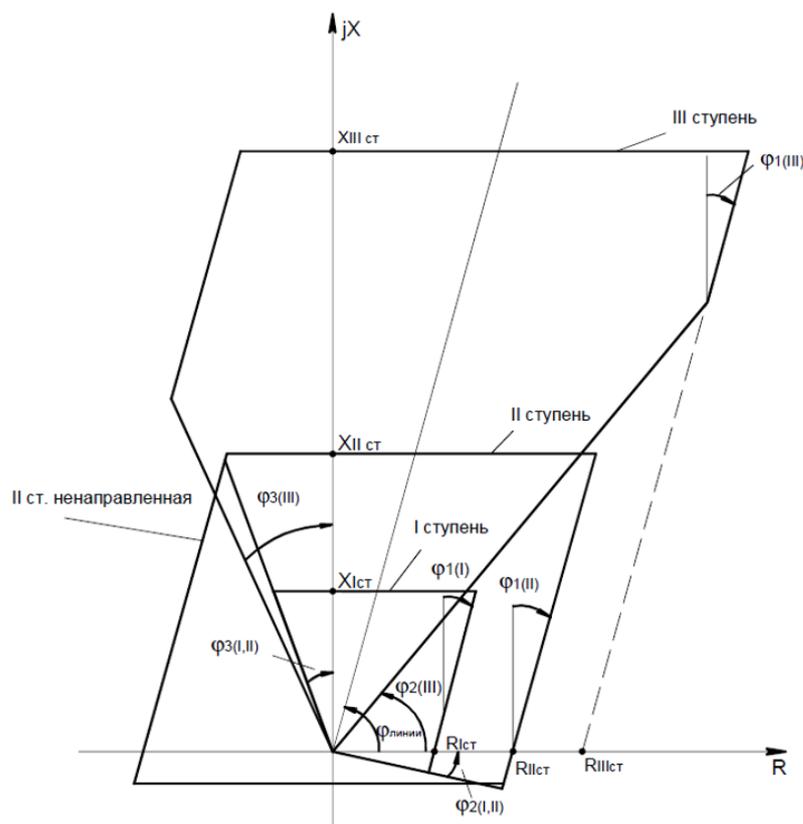


Рисунок 16 – Характеристика срабатывания реле сопротивлений первой, второй и третьей ступеней ДЗ воздушных линий 220 кВ

Заводские настройки позволили определить углы наклона границ для первой, второй и третьей ступени ДЗ ВЛ 220 кВ, которые приведены в таблице 18.

Таблица 18 – Углы наклона границ первой, второй, третьей ступеней ДЗ ВЛ 220 кВ

Номер ступени	Угол наклона		
	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$
I ступень	$10,5^\circ$	$-15^\circ$	$-25^\circ$

Продолжение таблицы 18

Номер ступени	Угол наклона		
	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$
II ступень	20°	-15°	-25°
III ступень	20°	50°	-25°

Для воздушных линий 220 кВ «Северсталь-1» и «Северсталь-2» значения углов определяются по формулам (22) и (23):

$$\varphi_L = \arctg\left(\frac{X_{Л.УД}}{r_{Л.УД}}\right), \quad (22)$$

$$\varphi_L = \arctg\left(\frac{0,43}{0,08}\right) = 79,5$$

$$\varphi_{1(I)} = 90^\circ - \varphi_L^\circ. \quad (23)$$

$$\varphi_{1(I)} = 90^\circ - 79,5^\circ = 10,5.$$

Из руководства по эксплуатации ШЭ2607 021021 [27] выберем углы  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$  установленные по умолчанию. Угол наклона  $\varphi_2$  для III ступени должен быть отстроен от нагрузки по неравенству (24):

$$\varphi_{НАГР} + \varphi_{ЗАП} < \varphi_2^{III}, \quad (24)$$

$$\cos(0,85) + 12^\circ = 37,81^\circ + 12^\circ = 49,8^\circ < \varphi_2^{III} = 50^\circ.$$

Зная углы наклона углы наклона границ первой, второй, третьей ступеней ДЗ ВЛ 220 кВ, значения которых приведены в таблице 18, определим  $X_{С.Р}$  и  $R_{С.Р}$  во вторичных величинах для всех ступеней защит. Результаты сведены в таблицу 19.

Полученные расчетные значения  $X_{С.Р}$  и  $R_{С.Р}$  на первой, второй, третьей ступенях ДЗ1-ДЗ6 позволят обеспечить селективную и надежную защиту воздушных линий 220 кВ «Северсталь-1» и «Северсталь-2» ПС 220 кВ.

Таблица 19 – Расчетные значения  $X_{C.P.}$  и  $R_{C.P.}$  на первой, второй, третьей ступенях ДЗ1-ДЗ6 на воздушных линиях 220 кВ

Ступень ДЗ		ДЗ1	ДЗ2	ДЗ3	ДЗ4	ДЗ5	ДЗ6
I ступень	$X_{C.P., Ом}$	3,34	3,34	2,66	2,66	4,03	4,03
	$R_{C.P., Ом}$	1,53	1,53	1,4	1,4	1,66	1,66
II ступень	$X_{C.P., Ом}$	5,19	6,2	5,54	5,06	6,32	5,32
	$R_{C.P., Ом}$	3,02	3,4	3,16	2,98	3,44	3,07
III ступень	$X_{C.P., Ом}$	7,92	-	-	7,92	17,3	17,5
	$R_{C.P., Ом}$	3,98	-	-	3,98	7,39	7,46

Выполнена проверка рассчитанных уставок второй ступени ДЗ1 при трехфазном и двухфазном КЗ на линии L1 (ВЛ 220 кВ «Северсталь-1») для выбранных шкафов ШЭ2607 021021.

При трехфазном КЗ на линии L1 вблизи защиты ДЗ1 значение тока  $I_K^{(3)}$  вторичных цепей будет равно:

$$I_K^{(3)} = \frac{6436}{400} = 16,09 \text{ А.}$$

Значение напряжения при трехфазном КЗ снижается до нуля.

При двухфазном КЗ между фазами А и В в конце линии L1 значение тока КЗ вторичных цепей по выражению (25):

$$I_{K.AB.BT}^{(2)} = \frac{I_K^{(2)}}{I_{НОМ1ТТ}}, \quad (25)$$

где  $I_K^{(2)}$  – расчетное значение тока двухфазного КЗ в конце линии L1.

$$I_{K.AB.BT}^{(2)} = \frac{5574}{400} = 13,93 \text{ А.}$$

Напряжение на выводах вторичных цепей по выражению (26):

$$U_{K.BT} = I_{K.AB.BT}^{(2)} \cdot X_{L1}, \quad (26)$$

где  $I_{К.АВ.ВТ}^{(2)}$  – расчетное значение тока двухфазного КЗ на выводах вторичных цепей.

$$U_{К.ВТ} = 13,93 \cdot 21,45 \cdot \frac{\frac{400}{\frac{1}{\frac{220000}{\sqrt{3}}}}}{\frac{100}{\sqrt{3}}} = 54,327 \text{ В.}$$

В результате в действие пришли вторая и третья ступень ДЗ. Осциллограммы приведены на рисунках 17 и 18.

Из представленных графиков 17 и 18 видно, что при условии трехфазного и двухфазного КЗ на линии L1 в действие приходили отдельные ступени разных измерительных органов сопротивления. Уставки ДЗ линии L1 выбраны правильно.



Рисунок 17 – Показания осциллографов, подключенных к дискретным выходам трех ступеней измерительного органа сопротивления АВ, при трехфазном КЗ на линии L1

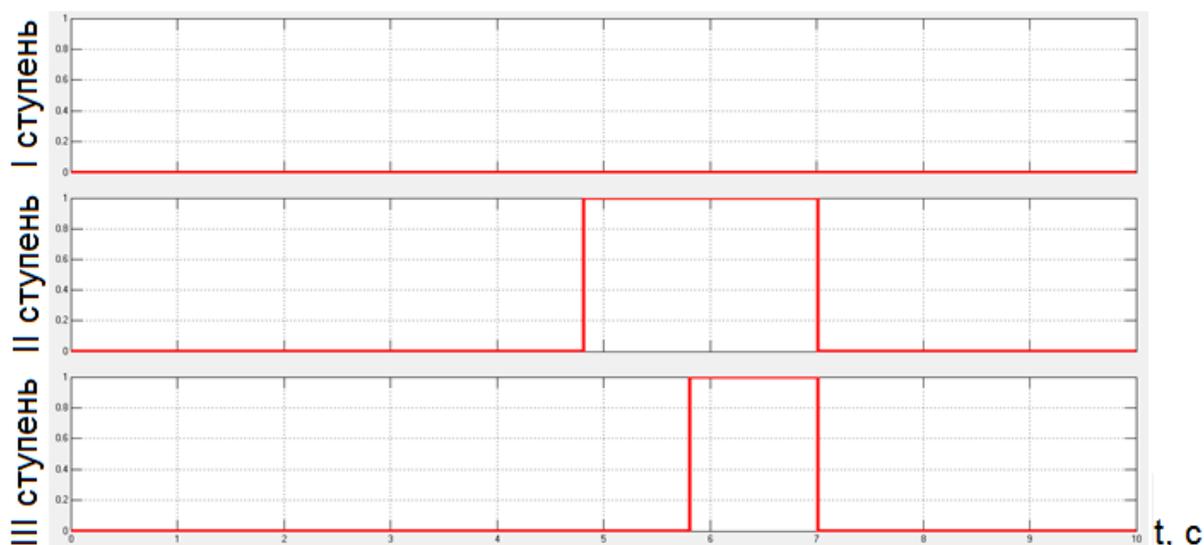


Рисунок 18 – Показания осциллографов, подключенных к дискретным выходам трех ступеней измерительного органа сопротивления АВ при двухфазном КЗ в конце линии L1

Выводы по разделу. Выполнен расчет дистанционной защиты воздушных линий 220 кВ «Северсталь-1» и «Северсталь-2». Расчет дистанционной защиты ВЛ 220 кВ выполнен по стандарту организации ПАО «ФСК ЕЭС». Для реализации дистанционной защиты линий 220 кВ выбран шкаф типа ШЭ2607 011021. Выбранный двойной комплект шкафов ШЭ2607 011021 обеспечивает интеграцию с резервными защитами, а также возможность телеотключения и телеускорения.

На основании возможных аварийных режимов сети рассмотрены расчетные варианты функционирования сети 220 кВ и 110 кВ (все линии 220 кВ включены, отключение одной из линий 220 кВ, отключение АТ-1 или АТ-2). Выполнен расчет уставок ДЗ1-ДЗ6 ВЛ 220 кВ «Северсталь-1» и «Северсталь-2», проверена чувствительность защит ДЗ1-ДЗ6 для режима 1 (КЗ на шинах внешней энергосистемы ЭС2 в конце ВЛ 220 кВ «Северсталь-2», ремонтная перемычка между АТ-1 и АТ-2 включена) и режима 2 (КЗ на шинах 110 кВ АТ-2, АТ-1 отключен, ремонтная перемычка между АТ-1 и АТ-2 отключена). Выполнена проверка рассчитанных уставок второй ступени ДЗ1 при двухфазном КЗ на ВЛ 220 кВ «Северсталь-1».

## Заключение

В ВКР рассмотрено проектирование электрической части ПС 220 кВ ПАО «Северсталь», которая входит в Вологодско-Череповецкий энергоузел Вологодской энергосистемы. ПС 220 кВ ПАО «Северсталь» включена в транзит 220 кВ через ВЛ 220 кВ «Северсталь-2» между ПС 500 кВ «Череповецкая» и ПС 750 «Белозерская». Рассматриваемая подстанция по пяти ВЛ 110 кВ обеспечивает электроснабжение металлургического комбината ОАО «Северсталь».

На ПС 220 кВ предусмотрена установка двух автотрансформаторов. На основании графиков загрузки сетей 110 кВ и 10 кВ выбраны АТ-1 и АТ-2 типа АТДЦТН-125000/220/110.

На ПС 220 кВ ПАО «Северсталь» приняты два открытых комплектных распределительных устройства ОРУ 220 кВ и ОРУ 110 кВ, а также КРУ 10 кВ. Схемы ОРУ 220 кВ и ОРУ 110 кВ, КРУ 10 кВ и собственных нужд выбраны типовыми в соответствии с требованиями стандартов организации ПАО «ФСК ЕЭС».

На основании анализа возможных аварийных электрических режимов подстанции выбран наиболее тяжелый аварийный режим, для которого выполнен расчет токов КЗ, что позволило выбрать коммутирующее оборудование – выключатели и разъединители и измерительные трансформаторы тока и напряжения на ПС 220 кВ ПАО «Северсталь».

Выполнен расчет дистанционной защиты воздушных линий 220 кВ «Северсталь-1» и «Северсталь-2». Для реализации дистанционной защиты ВЛ 220 кВ ПС 220 кВ выбраны шкафы типа ШЭ2607 011021 ООО НПП «ЭКРА». Построена характеристика срабатывания реле сопротивлений первой, второй и третьей ступеней ДЗ воздушных линий 220 кВ «Северсталь-1» и «Северсталь-2» ПС 220 кВ, выбраны уставки защит первой, второй, третьей ступеней ДЗ1-ДЗ6 ВЛ 220 кВ.

## Список используемой литературы и используемых источников

1. Алиев И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию. М.: Высшая школа, 2020. 255 с.
2. Выключатель элегазовый ВБГУ-220. Руководство по эксплуатации АО ВО «Электроаппарат» [Электронный ресурс]. URL: <https://elektroapparat.ru/products/vyklyuchateli/vgbu-220/> (дата обращения 30.03.2024 г.).
3. Выключатель элегазовый ВБГУ-110. Руководство по эксплуатации АО ВО «Электроаппарат» [Электронный ресурс]. URL: <https://elektroapparat.ru/products/vyklyuchateli/vgbu-110/> (дата обращения 30.03.2024 г.).
4. Высоковольтные вакуумные выключатели ВБЭ-10-20 Руководство по эксплуатации НПП «Контакт» [Электронный ресурс]. URL: <https://kontakt.nt-rt.ru/images/manuals/4-3.PDF> (дата обращения 30.03.2024 г.).
5. ГОСТ Р 52735-2007 Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. М.: Стандартиформ, 2007. 39 с.
6. Дьяков А.Ф., Овчаренко Н.И. Микропроцессорная автоматика и релейная защита электроэнергетических систем: учебное пособие для вузов. М: Издательский дом МЭИ, 2010. 336 с.
7. Ерошенко С.А. Расчет токов коротких замыканий в энергосистемах: учебное пособие. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2019. 108 с.
8. Измерительные трансформаторы напряжения. Справочник покупателя [Электронный ресурс]. URL: <https://library.e.abb.com/public/> (дата обращения 14.05.2024 г.).
9. Каталог разъединителей ЗАО «ЗЭТА» [Электронный ресурс]. URL: <https://zeto.ru/rg-220-110-kv/> (дата обращения 14.05.2024 г.).

10. Каталог трансформаторов ООО «Тольяттинский трансформатор» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.bktp.ru> <http://transformator.com.ru> (дата обращения 14.05.2024 г.).

11. Киреева Э.А. Электрооборудование электрических станции и подстанций. М.: КНОРУС, 2022. 320 с.

12. Кокин С.Е., Дмитриев С.А. Проектирование подстанций распределительного электросетевого комплекса. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2018. 192 с.

13. Короткие замыкания и выбор электрооборудования: учебное пособие для вузов / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев и др.; под ред. И.П. Крючкова, В.А. Старшинова. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – 568 с.

14. Методические указания по применению ограничителей в электрических сетях 110-750 кВ/ ОАО «Институт «Энергосетьпроект», ОАО ВНИИЭ, НТК «ЭЛ-ПРОЕКТ». М.: РАО «ЕЭС России», 2000. 36 с.

15. Немировский А.Е., Сергиевская И.Ю., Крепышева Л.Ю. Электрооборудование электрических сетей, станций, подстанций. М.: Инфра-Инженерия, 2023. 176 с.

16. Овчаренко Н.И. Автоматика энергосистем: учебник для ВУЗов. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. 476 с.

17. Отчет по проекту «Разработка и внедрение цифровых электрических подстанций и станций на вновь строящихся и реконструируемых объектах энергетики» [Электронный ресурс]. URL: [gis.rosenergo.gov.ru](http://gis.rosenergo.gov.ru) (дата обращения 30.03.2024 г.).

18. Правила устройств электроустановок. С.Пб.: Энергоатомиздат, 2003. 377 с.

19. Разрядники 220 кВ и 110 кВ. Каталог продукции ЗАО «ЗЭТО» [Электронный ресурс]. URL: <https://zeto.ru/s-polimernoy-vneshney-izolyatsiey-110-220-kv/> (дата обращения 10.04.2024).

20. Руководство по эксплуатации трансформаторов тока типа ТВ-220, ТВ-110 [Электронный ресурс]. URL: <https://cztt.pro-solution.ru/wp-content/uploads/2020/09/9.8.pdf> (дата обращения 30.03.2024 г.).

21. СТО 56947007-29.240.30.010-2008. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35-750 кВ. Типовые решения. М.: Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС», 2007. 132 с.

22. СТО 70238424.29.240ЛЮ.013-2009. Системы собственных нужд подстанций. Условия создания. Нормы и требования. М.: Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС», 2009. 81 с.

23. СТО 59012820.29.020.008-2015. Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Автоматика ликвидации асинхронного режима. Нормы и требования. М.: Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС», 2015. 83 с.

24. СТО 56947007-29.120.70.200-2015. Методические указания по расчету и выбору параметров настройки (уставок) микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики производства ООО НПП «ЭКРА», «ABB», «GE Multilin», «ALSTOM Grid», «AREVA» для воздушных и кабельных линий с односторонним питанием напряжением 110-330 кВ. М.: Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС», 2015. 356 с.

25. СТО 56947007-29.240.10.248-2017. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ. М.: Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС», 2017. 135 с.

26. Федотов В.П., Старосельников С.С., Федотова Л.А. Проектирование микропроцессорных защит элементов электрических сетей напряжением 110–220 кВ : учебно-методическое пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 268 с.

27. Шкафы защиты линии и автоматики управления линейны с выключателем типов ШЭ2607 011021, ШЭ2607 012021 (версия ПО 012\_200 и 021\_200). Руководство по эксплуатации ЭКРА.656453.022 РЭ [Электронный

ресурс]. URL: [https://k-energo.com/documents/rukovodstva/she2607\\_200.pdf](https://k-energo.com/documents/rukovodstva/she2607_200.pdf)  
(дата обращения 30.03.2024 г.).

28. Borojani K.G., Amini M.N., Iyengar S.S. Smart Grids: Security and Privacy Issues. Springer, 2017. 113 p.

29. IEC 61850-5. Communication networks and systems for power utility automation – Part 5: Communication requirements for functions and device models. IEC 2022, 15 p.

30. Fusheng L., Ruisheng L., Fengguan Z., Microgrid Technology and Engineering Application. China Electric Power Press, 2016. 184 p.

31. Line distance protection REL670 2.0 IEC. Technical Manual. Copyright 2014 ABB, 2014. 64 p.

32. Taft J., Martini P. Life Scale Power System Control Architecture. A Strategic Frame-work for Integrating Advanced Grid Functionality CISCO, 2012. 25 p.