

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 узловой подстанции 220/110/10 кВ

Обучающийся

А.А. Ермаков

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., О.В. Самолина

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

Тольятти 2025

Аннотация

Бакалаврская работа выполнена на основании сделанного анализа по реконструкции электрической части узловой подстанции на 220/110/10 кВ Княжево. Для раскрытия ВКР сделан анализ действующей схемы подстанции 220/110/10 0 кВ Княжево. Представлена характеристика подстанции, где предложены мероприятия по реконструкции электрической части, в частности замена оборудования ОРУ 220 кВ. Составлены таблицы монтируемое и демонтируемое оборудования в ОРУ 220 кВ. А также предложены мероприятия по предотвращению феррорезонанса. Описаны причины феррорезонансных явлений, представлены возможные колебательные контуры, которые могут возникнуть на подстанции 220/110/10 кВ и могут привести к аварийным режимам работы. Сделан расчет токов короткого замыкания, расчет и выбор оборудования ОРУ 220 кВ.

Расчет контура заземления ПС 220/110/10 кВ, описаны способы защиты подстанции от грозовых перенапряжений и прямых ударов молнии.

Данная бакалаврская работа состоит из двух частей: пояснительной записки объемом 51 страницы, которая включает 7 рисунков, 9 таблиц, список используемых источников из 20 наименований и графической части из 6 чертежей на листах формата А1.

Содержание

Введение	4
1 Характеристика объекта проектирования ПС220 кВ	5
2 Обоснование проведения реконструкции ОРУ 220 кВ	10
3 Выбор электрического оборудования и проводников на основании расчетов токов короткого замыкания	12
4 Расчет системы заземления и молниезащиты ПС 220/110/10 кВ	31
5 Феррорезонансные явления и мероприятия защиты	39
Заключение	48
Список используемых источников	50

Введение

Энергообъект ПС220/110/10 кВ Княжево расположен в Тюменской области, Тюменского района, д. Песьянка, поселение Княжевский, который обеспечивает электроснабжение потребителей.

Энергообъект ПС220/110/10 кВ Княжево расположен в Тюменской области, Тюменского района, д. Песьянка, поселение Княжевский, который обеспечивает электроснабжение потребителей.

ПС 220 кВ входит в состав межсистемного транзита линий электропередач напряжением 220кВ Княжево — Заводоуковск протяженность линии составляет 62,5 км, которая была введена в эксплуатацию 30 лет назад [5]. Объект расположенный на границе Ялуторовского и Заводоуковского районов участвует в транзите электроэнергии от Тюменской ТЭЦ—2. Энергообъект является организацией собственника или иного законного владельца объекта Филиала публичного акционерного общества «Федеральная сетевая компания Россети» — Южное предприятие Магистральных электрических сетей (Филиал ПАО «Россети» — Южное ПМЭС). Было проведено на основании исследования данных действующая система электроснабжения главной узловой подстанции напряжением 220 кВ Княжево. И после анализа данных предложены этапы реконструкции электросетевых объектов, объектов, осуществляющих генерацию и динамику изменения электрических нагрузок.

В ходе реконструкции будут выполнены этапы [4]:

- замена высоковольтного оборудования в ОРУ 220 кВ;
- мероприятия по предотвращению феррорезонанса 1(2) ТН-220.

Для обеспечения надежности и бесперебойности электроснабжения потребителей [18], будет проведена частичная замена существующего электрооборудования на выбранное проектируемое.

1 Характеристика объекта проектирования ПС220 кВ

Подстанция 220/110/10 кВ Княжево осуществляет электроснабжение энергосистемы Тюменской области через межсистемный транзит ЛЭП 220 кВ "Княжево – Заводоуковск".

Подстанция 220/110/100 кВ «Княжево» является действующей, год ввода в эксплуатацию 1976.

В состав ПС 220/110/10 кВ входят распределительные устройства ОРУ—220кВ, ЗРУ-10 кВ, КРУН. ОРУ—220 кВ имеет двойную систему шин с ОСШ, ЗРУ – НПС– 1 и НПС– 2 находятся на территории ЛПДС и обслуживаются персоналом ЛПДС имени Чепурского. На ПС 220 кВ установлены два автотрансформатора, АТ1 — марки АТДЦН—125000/220/110/10 кВ, АТ2 — марки АТДЦТН — 125000/220/110/10—68У1.

В открытом распределительном устройстве ОРУ 220 кВ установлены силовые трансформаторы 3Т, 4Т – марки ТРДН-40000/110, установлены два вольтодобавочных трансформатора 1ВДТ, 2ВДТ – марки ЛТДН-40000/10кВ.

Основными потребителями ПС 220/110/10 кВ «Княжево» являются региональные подразделения Южных предприятий Магистральных электрических сетей, а также потребители предприятия агропромышленного комплекса.

Схемы распределительных устройств ПС 220/110/10 кВ Княжево:

- ОРУ 220кВ имеет одну рабочую шину, секционированную выключателем и обходную систему шин;
- ОРУ –110 - две рабочие и обходная системы шин;
- ЗРУ-10 – НПС – 1 и НПС – 2 находятся на территории ЛПДС и обслуживаются персоналом ЛПДС им. Чепурского.
- распределительные устройства подключены к автотрансформаторам 1АТ, 2АТ и силовым трансформаторам 3Т и 4Т ПС 220/110/10 кВ Княжево шинными мостами.

Открытое распределительное устройство ОРУ 220 кВ представляет модульную конструкцию, состоящую из отдельных блоков с установленным в них высоковольтным оборудованием с жесткой ошиновкой, кабельными конструкциями, шкафами вторичной коммутации, элементов заземления [9].

Постановка под напряжение ВЛ 220 кВ ТТЭЦ 2 – Княжево производится, со стороны ПС 220 кВ Княжево. Снятие напряжения с ВЛ 220 кВ ТТЭЦ 2 – Княжево производится, со стороны ТТЭЦ 2.

Постановка под напряжение ВЛ 220 кВ Княжево – Ожогоино производится, со стороны ПС 220 кВ Княжево. Снятие напряжения с ВЛ 220 кВ Княжево – Ожогоино производится, со стороны ПС Ожогоино.

Постановка под напряжение ВЛ 220 кВ Заводоуковск – Княжево производится, со стороны ПС 220 кВ Княжево. Снятие напряжения с ВЛ 220 кВ Заводоуковск – Княжево производится, со стороны ПС 220 кВ Заводоуковск.

Допускается кратковременная параллельная работа силовых трансформаторов 3Т и 4Т, 1АТ и 2АТ на напряжении 10 кВ на время переключений при переводе нагрузок с одного трансформатора на другой.

Операции по включению и отключению разъединителей на шинных мостах 10 кВ 1АТ, 2АТ, 3Т, 4Т разрешаются только после отключения, соответствующего В-10 трансформатор в ЗРУ–10 НПС–1 или НПС–2 [8].

Шинные мосты напряжением 10 кВ от вольтодобавочных трансформаторов 1ВДТ, 2ВДТ, силовых трансформаторов 3Т, 4Т до ЗРУ–10 НПС–2 и НПС–1 входят в зону действия дифференциальной защиты соответствующего трансформатора. Силовые трансформаторы 3Т, 4Т работают с изолированной нейтралью 110 кВ.

Настоящее время в ОРУ 220 кВ установлены воздушные выключатели марки ВМТ – 220Б–25/1000 кВ, выносные трансформаторы тока марки ТФЗМ – 220 111У1, разъединители марки РДЗ–220/1000 кВ, с ручными приводами устанавливаемых на главных и заземляющих ножах, трансформаторы напряжения марки НКФ–220–58У1, вентильные разрядники марки РВС– 220 кВ. Установленное оборудование на ПС 220/110/100 кВ в ОРУ 220 кВ

морально и физически устарело и требует замены. Поэтому предлагается провести реконструкцию по замене оборудования в ОРУ 220 и ставить более современное оборудование, а также рассмотреть мероприятия по предотвращению феррорезонанса трансформаторов напряжения 1(2) ТН–220.

В таблице 1 предоставлена ведомость демонтируемого силового оборудования ПС220/110/10 кВ Княжево [6].

Таблица 1 – Ведомость демонтируемого силового оборудования ОРУ220 кВ

Наименование силового оборудования	Ед.изм	Количество, шт.
Выключатель высоковольтный марки ВМТ –220Б– 25/1250УХЛ1	шт.	7
Разъединитель марки РДЗ–2–220/1000	шт.	13
Разъединитель марки РДЗ–1–б–220/1000	шт.	3
Трансформатор напряжения марки НКФ–220–58У1	шт.	7
Трансформатор тока марки ТФЗМ–220–111У1	шт.	21
Ограничители перенапряжения марки ОПН– 220 УХЛ1	шт.	12

После анализа технического состояния оборудования ОРУ– 220 кВ, предложена модернизация и предложено применить к использованию оборудование:

- выключатели со сторон 220 кВ –элегазовые трехполюсные с встроенными трансформаторами тока марки ВЭБ-УЭТМ;
- измерительные трансформаторы тока марки ВЭБ– УЭТМ встроенные в вводы выключателя;
- разъединители горизонтально- поворотные с двигателем приводом для главных и заземляющих ножей марки РГ–220–1000 (УХЛ1);
- антирезонансные, емкостного типа измерительные трансформаторы

напряжения марки НАМИ – 220УХЛ1;

- ограничители перенапряжения нелинейные, со счетчиком срабатываний марки ОПН-П 220 кВ. Данные силового электрооборудования при реконструкции ОРУ–220 кВ сводим в таблицу 2.

Таблица 2 – Ведомость установленного силового оборудования ОРУ–220кВ, после реконструкции

Наименование силового оборудования	Ед.изм.	Кол-во
Элегазовый, высоковольтный, трехполюсный с встроенными трансформаторами тока марки ВЭБ–УЭТМ с параметрами $I_n = 1000\text{А}$, $I_{\text{терм}} = 31,5\text{кА}$, $I_{\text{дин.}} = 80\text{кА}$.	шт.	7
Разъединитель трехполюсный горизонтально-поворотный, с двигательными приводами для главных и заземляющих ножей, с двумя заземляющими ножами РГ– 220– 1000(УХЛ1), с параметрами $I_n = 1000\text{А}$, $I_{\text{терм}} = 31,5\text{кА}$, $I_{\text{дин.}} = 80\text{кА}$.	шт.	13
Разъединитель однополюсный горизонтально-поворотный, с двигательными приводами для главных и заземляющих ножей, с двумя заземляющими ножами РГ– 1– б– 220/1000	шт.	3
Измерительный трансформатор напряжения марки НАМИ– 220УХЛ1 220/ $\sqrt{3}$ / 0,1/ $\sqrt{3}$ / 0,1 / 0,1/ $\sqrt{3}$, класс точности 0,2/3Р/0,2.	шт.	7
Трансформатор тока марки ТВГ–220 кВ, коэффициент трансформации $K_{\text{ТТ}} = 500–1000/1\text{А}$, класс точности 0,2S/0,2или коэффициент трансформации $K_{\text{ТТ}} = 500–1000$, класс точности 5Р/5Р.	шт.	21
Ограничители перенапряжения марки ОПНп– 220 УХЛ1 ,номинальный разрядный ток10 кА	шт.	12

На рисунке 1 представлена схема ОРУ–220 кВ с двумя системами шин – одна рабочая с секционным выключателем и обходная [16].

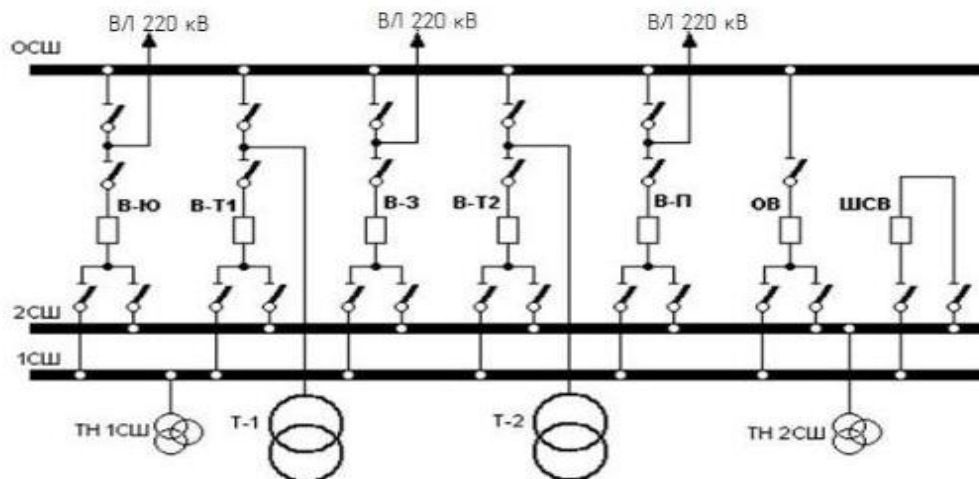


Рисунок 1 – Схема ОРУ 220 кВ ПС 220/110/10 кВ «Княжево»

После установки модернизированного электрооборудования в ОРУ220 кВ необходимо вновь сделать подключение воздушных линий:

- ВЛ 220 от ТТЭЦ 2–Княжево;
- ВЛ 220 от Княжево–Ожогино;
- ВЛ 220 от Заводоуковск–Княжево.

2 Обоснование проведения реконструкции ОРУ 220 кВ

Целью реконструкции ОРУ 220 кВ является замена существующего оборудования на модернизированное, которое обеспечит бесперебойность, надежность электроснабжения потребителей

«Для монтажа оборудования устанавливаем приемные порталы ВЛ-220 кВ, чтобы обеспечить углы натяжения проводов при заходе в ячейку» [4].

«При установке выключателей и шинных опор, установленных вдоль дорог, необходимо учитывать проезд ремонтных механизмов под ошиновкой без снятия напряжения. Соединения внутри ячеек распределительного устройства и сборные шины осуществляется сталеалюминевыми проводами» [16].

«Элегазовые выключатели марки ВЭБ – 220 УЭТМ изготавливаются в трехполюсном исполнении, полюса выключателя имеют одно разрывные дугогасительные камеры, высоковольтные вводы, которые установлены на опорной раме, покрытой горячим цинком. Управление выключателем происходит пружинным приводом типа ППВ. В шкафу привода установлена автоматическая система включения и контроля обогрева мощностью 500 Вт и не отключаемого антиконденсатного обогрева мощность 70 Вт. Номинальное напряжение для питания обогрева 230 В. В электрической схеме привода имеется переключатель выбора режима управления «местное/дистанционное», реле блокировки от многократных включений и реле блокировки выполнения операций «В» и «О» при снижении давления элегаза ниже допустимых значений» [17].

«Элегазовый выключатель комплектуется встроенными измерительными выключателями тока марки ТВГ– 220 кВ, которые устанавливаются на вводы выключателя» [12].

«Для коммерческого учета, измерения электрических величин и подключения релейной защиты и автоматики на полюсах элегазового выключателя можно устанавливать до шести трансформаторов тока» [16].

При модернизации ОРУ 220 кВ установили разъединители марки РГ–220 – 1000 (УХЛ1), которые включают и отключают участки линии под напряжением, но без нагрузки и заземляют отключенные участки заземляющими ножами. В разъединителях применены высокопрочные фарфоровые или полимерные изоляторы, установлена механическая блокировка, противокоррозийная защита, надежные контактные системы, которые обеспечивают высокую стойкость к токам.

Установили измерительные трансформаторы напряжения марки НАМИ– 220УХЛ1. Измерительные ТН позволяют преобразовать высокое напряжение, на напряжение для подключения измерительных приборов цепей напряжения релейной защиты и автоматики.

Измерительные трансформаторы напряжения имеют фарфоровую оболочку, она защищает его от механических повреждений извне и обслуживающий персонал при коротких замыканиях, чтобы никто не попал под напряжение.

Трансформатор напряжения работает в режиме холостого хода и для того, чтобы показания приборов были точными и достоверными устанавливают резисторы. Дополнительно к трансформаторам напряжения можно установить конденсатор связи. Измерительный ТН имеет абсорбционный фильтр для предупреждения старения и увлажнения масла.

3 Выбор электрического оборудования и проводников на основании расчетов токов короткого замыкания

Нормальная работа систем электроснабжения может быть нарушена из-за коротких замыканий. Процесс короткого замыкания вызывает резкое снижение электрического сопротивления и увеличение тока в сети и снижения напряжения. Режим короткого замыкания – непредусмотренное соединение между фазами или между фазой/фазами и землей [17].

Вычислять токи короткого замыкания, необходимо для выбора коммутационной и защитной аппаратуры, проектирования релейной защиты и автоматики. Настройка релейной защиты и автоматики, правильность выбора коммутационной аппаратуры, проверка ее на термическую и динамическую стойкости зависит от четких и правильных расчетов токов короткого замыкания.

«Для расчета токов короткого замыканий необходимо составить схему замещения с указанием элементов цепи, по которым протекают аварийные токи. Указанные параметры рассчитываются в именованных или относительных единицах и полученные значения приводятся к основной ступени напряжения. Для расчетов параметров цепи используют систему относительных единиц, вводятся базисные величины мощности, базисного напряжения на ступени, выбранной в качестве основной» [11].

На рисунке 2 представлена схема расчета токов короткого замыкания, а на рисунке 3 представлена схема замещения [10].

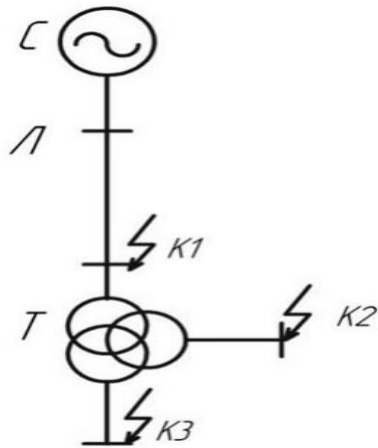


Рисунок 2 - Расчетная схема электроустановки

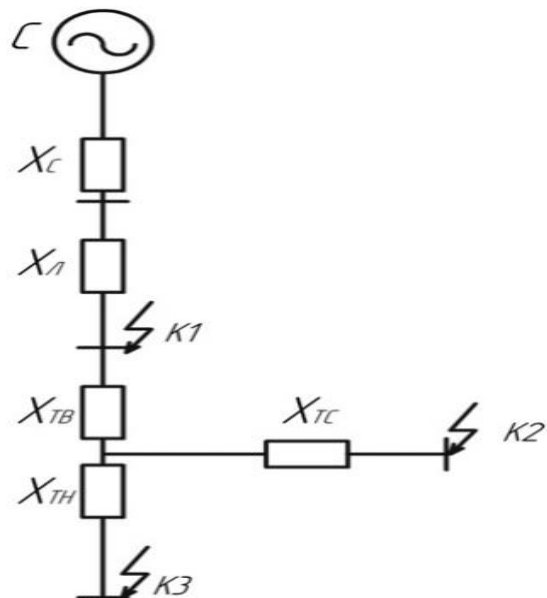


Рисунок 3 - Эквивалентная схема замещения электроустановки

Рассчитаем сопротивления всех элементов схемы замещения в относительных единицах [13].

Принимаем базисную мощность $S_б = 1000$ МВА, базисное напряжение $U_б = 230$ кВ, мощность короткого замыкания $S_{кз} = 4500$ МВА. Длина линии 62,5 км.

Рассчитываем сопротивление системы:

$$X_c = S_б / S_{кз} , \quad (1)$$

$$X_c = 1000/4500 = 0,22$$

Рассчитываем индуктивное сопротивление для линии электропередач:

$$X_{\text{Л}} = \frac{x_0 \cdot l \cdot S_6}{U_6^2} \quad (2)$$

где x_0 – удельное сопротивление провода, Ом/км.;

l – длина линии, км.;

S_6 – базисная мощность, МВА.;

U_6 – базисное напряжение, кВ.

$$X_{\text{Л}} = \frac{0,42 \cdot 62,5 \cdot 1000}{230^2} = 0,49$$

Рассчитываем эквивалентное сопротивление для линии электропередач:

$$X_{\text{ЛЭ}} = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_1 + X_2} \quad (3)$$

$$X_{\text{ЛЭ}} = \frac{0,49 \cdot 0,49}{0,49 + 0,49} = 0,25$$

Рассчитываем реактивное сопротивление трансформатора:

$$X_{\text{T}} = \frac{u\% S_6}{100 \cdot S_{\text{н.тр.}}} \quad (4)$$

где $S_{\text{н.тр.}}$ – номинальная мощность автотрансформатора, МВА;

$U_k\%$ – напряжение короткого замыкания автотрансформатора, %.

$$X_{\text{T}} = \frac{10,5 \cdot 100}{100 \cdot 2,5} = \frac{1050}{2,5} = 4,2$$

Рассчитываем результирующее сопротивление до точки К1:

$$X_{\text{рез 1}} = X_{\text{с}} + X_{\text{ЛЭКВ}} \quad (5)$$

где $X_{\text{Л}}$ – сопротивление систем;

$X_{\text{с}}$ – сопротивление линии эквивалентное.

$$X_{\text{рез 1}} = 0,22 + 0,25 = 0,47$$

Рассчитываем базисный ток:

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6} \quad , \quad (6)$$

где S_6 – базисная мощность линии 220кВА;

U_6 – базисное напряжение для линии, 230 кВ.

$$I_6 = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 230} = 2,51 \text{ кА}$$

Рассчитываем трехфазный ток короткого замыкания в точке K_1 :

$$I_K^{(3)} = \frac{I_6}{Z_{PE31}} \quad (7)$$

где I_6 – базисный ток линии, кА;

$Z_{рез}$ – результирующее сопротивление линии.

$$I_K^{(3)} = \frac{2,51}{0,47} = 5,3 \text{ кА}$$

Рассчитываем ударный ток короткого замыкания в точке K_1 :

$$i_y = \sqrt{2} \cdot S_{расч} \times K_y \times I_K^{(3)} \quad (8)$$

где K_y – коэффициент ударности, для линии 220 кВ = 1,717.

$$i_y = \sqrt{2} \times 1,717 \times 5,3 = 13,83 \text{ кА}$$

На основании суточных записей (таблица 3) показателей ПС 220/110/10 кВ, подсчитана суммарная нагрузка, которая составила 330 МВА.

Таблица 3 – Суточные записи показателей (06.11.2024г)

U _н ,= 220 кВ	РПН	U _н , - 110кВ	U _н , - 10кВ	I, А -220	I, А -110	P,кВт	Q, кВАр
220	7	123	10,4	146	276	53	24

Рассчитываем расчетный ток [19]:

$$I_{\text{расч.}} = S_{\text{расч.}} / \sqrt{3} \times U_{\text{н}} \quad (9)$$

где $S_{\text{расч}}$ расчетная мощность, кВА;

$U_{\text{н}}$ – номинальное кВ.

$$I_{\text{расч.}} = 330 / \sqrt{3} \times 220 = 867 \text{ А}$$

Выключатель высокого напряжения является коммутационным аппаратом и предназначен для отключения электрической цепи при коротком замыкании, токов нагрузки.

Требования, предъявляемые к коммутационным аппаратам [17]:

- отключение цепи от десятков ампер до токов отключения;
- быстродействие;
- включение выключателя после срабатывания АПВ;
- пожаробезопасность.

В результате реконструкции применяем для установки в ОРУ 220 кВ элегазовые высоковольтные выключатели, они предназначены для оперативного управления и контроля высоковольтной линии энергоснабжения. Достоинство элегаза его долговечность, выключатели не нуждаются в очистке рабочих контактов, в отличие масляных. В элегазовых выключателях используют шести фтористую серу в качестве дугогасящей и изолирующей среды. При подаче команды на отключение размыкаются главные контакт, а затем дугогасящие. Между ними возникает электрическая дуга. Гашение дуги происходит из-за авто компрессии, когда поршень сжимает элегаз, создавая

поток газа, который охлаждает дугу. Принимаем для установки в ОРУ 220 кВ элегазовый выключатель марки ВЭБ-220УЭТМ.

Выбор выключателей по условиям:

– по номинальному току выключателя:

$$I_{н.выклд} \geq I_{расч.} \quad (10)$$

– по номинальному напряжению:

$$U_{н. выкл} \geq U_{н.сети} \quad (11)$$

– по роду установки и условиям работы;

– по конструктивному исполнению;

– отключающим способностям;

$$I_{н.отк} \geq I^{(3)}_{к.} \quad (12)$$

где $I^{(3)}_{к.}$ – ток короткого замыкания, кА;

$I_{н.отк}$ – номинальный ток отключения выключателя, кА.

Принимаем ток короткого замыкания на шинах 220 кВ $I^{(3)}_{к.} = 8,5$ кА.

Проверяем выключатель по отключающей способности:

$$i_{уд.} \geq i_{отк.} \quad (13)$$

где $i_{уд.}$ – ударный ток короткого замыкания, кА;

$i_{отк}$ – ток отключающей способности выключателя, кА.

Рассчитываем ударный ток короткого замыкания

$$i_{уд.} = \sqrt{2} \times I^{(3)}_{к.} \times K_y \quad (14)$$

где K_y – ударный коэффициент.

$$i_{уд.} = 1,41 \times 8,5 \times 1,717 = 12,83 \text{ кА}$$

Рассчитываем тепловой импульс тока короткого замыкания:

$$I_{\text{терм.}} \times t_{\text{терм}} \geq B_{\text{к}} \quad (15)$$

где $I_{\text{терм.}}$ – предельный ток термической стойкости, кА;

$t_{\text{терм.}}$ – нормативное время протекания предельного тока, с;

$B_{\text{к}}$ – тепловой импульс тока короткого замыкания по расчету, $\text{кА}^2 \times \text{с}$.

Рассчитываем тепловой импульс тока короткого замыкания:

$$B_{\text{к}} = I^{(3)}_{\text{к}} \times t_{\text{отк.}} \quad (16)$$

Рассчитываем время действия тока короткого замыкания:

$$t_{\text{отк.}} = t_{\text{р.з.}} + t_{\text{окл.в}} \quad (17)$$

где $t_{\text{р.з.}}$ – время действия релейной защиты, с;

$t_{\text{отк.}}$ – время отключения выключателя, с.

$T_{\text{а}}$ – постоянная времени затухания, с.

По данным релейной защиты [20] время действия релейной защиты $t_{\text{р.з.}} = 0,1$ с, время отключения выключателя $t_{\text{отк.}} = 0,07$ с, постоянная времени затухания $T_{\text{а}} = 0,03$ с.

$$t_{\text{отк.}} = 0,1 + 0,07 = 0,17 \text{ с}$$

Рассчитываем тепловой импульс тока короткого замыкания

$$B_{\text{к}} = I^{(3)}_{\text{к}} \times (t_{\text{р.з.}} + t_{\text{отк.}} + T_{\text{а}}) \quad (20)$$
$$B_{\text{к}} = 5,3^2 (0,1 + 0,07 + 0,03) = 14,45 \text{ кА}^2 \times \text{с}.$$

Данные расчета по выбору выключателя сводим в таблицу 4.

Принимаем для установки выключатель ВЭБ–УЭТМ–220 – выполненный в трехполюсном исполнении, полюса размещаются на одной раме и управляются одним пружинным приводом. Выключатель имеет встроенные трансформаторы тока марки ТВГ– 220 кВ. Параметры в таблице 4.

Таблица 4 – Условия выбора и проверки выключателя марки ВЭБ-УЭТМ

Условия выбора	Расчетные значения	Каталожные данные
$U_{н. выкл} \geq U_{н. сети}$	220 кВ	220 кВ
$I_{н. выклд} \geq I_{расч.}$	$I_{расч}=876$ А	$I_{ном} = 1000$ А
$I_{н.отк} \geq I^{(3)}_{к.}$	$I^3_{к}=5,3$ кА	$I_{ном.отк} = 50$ кА
$i_{дин}>i_{уд}$	$I_{уд}=12,83$ кА	$I_{дин}=80$ кА
$I_{терм.} \times t_{терм} = B_k$	$B_k = 14,45$ кА ² ×с.	$I^2_{тер} * t_{кз} = 99,23$ кА ² ×с.

При выборе разъединителей учитывают коммутационные возможности токи и операции, которые он способен коммутировать:

- нейтрали трансформаторов, заземленных дугогасящих реакторов;
- шины и оборудование всех напряжений;
- не нагруженные силовые трансформаторы.

Разъединители предназначены для коммутации обесточенных участков сети, находящихся под напряжением.

Условия выбора разъединителей:

- по конструкции;
- по месту установки;
- по номинальному напряжению;
- по номинальному току.

И проверяют разъединители на термическую и динамическую стойкости.

По номинальному напряжению установки:

$$U_{н.р} = 220 \text{ кВ} \geq U_{н.уст} = 220 \text{ кВ}$$

По номинальному току:

$$I_{н.р} = 1000 \text{ А} \geq I_{расч.} = 876 \text{ А}$$

По термической стойкости:

$$i_y = 12,83 \text{ кА} \leq i_{дин} = 31,5 \text{ кА}$$

На термическую стойкость:

$$B_k \leq I_{тер}^2 * t_{кз}$$

$$I_{кз}^{(3)2} * t_k = 31,5^2 * 0,1 = 99,23 \text{ кА}$$

Принимаем для установки в ОРУ–220 кВ разъединитель горизонтально-поворотного типа РГ–220/1000УХЛ1, параметры в таблице 5. Он выполнен в виде отдельных полюсов горизонтально-поворотного типа, в разъединителях применены высокопрочные фарфоровые [13].

Таблица 5 - Условия выбора и проверки выключателя марки РГ– 220– 1000

Условия выбора	Расчетные значения	Каталожные данные
$U_{н. выкл} \geq U_{н.сети}$	220 кВ	220 кВ
$I_{н.выклд} \geq I_{расч.}$	$I_{раб}=876 \text{ А}$	$I_{ном} = 1000 \text{ А}$
$I_{н.отк} \geq I^{(3)}_к.$	$I^3_к=5,3\text{кА}$	$I_{ном.отк} = 31,5 \text{ кА}$
$i_{дин} > i_{уд}$	$I_{уд}=12,83\text{кА}$	$I_{дин}=80 \text{ кА}$
$I_{терм.} \times t_{терм} = B_k$	$B_k = 14,45\text{кА}^2 \times \text{с.}$	$I_{тер}^2 * t_{кз} = 99,23 \text{ кА}^2 \times \text{с.}$

При выборе измерительных трансформаторов тока учитывают номинальные параметры, классы точности и способы подключения. Ошибки при выборе ТТ могут привести к нарушениям в работе сети и выходу из строя оборудования.

Встроенные трансформаторы тока применяются в качестве источника сигнала для создания систем управления выключателем, коммерческого учета, систем релейной защиты и автоматики.

Условия выбора трансформаторов тока:

- по напряжению установки, оно должно быть больше или равно расчетному напряжению нагрузки:

$$U_{уст} \leq U_{ном};$$

$$U_{н.с.} = 220\text{kV} \leq U_{н.сет.} = 220\text{kV}$$

- по номинальному первичному току, который должен соответствовать или быть близким к фактическому току в цепи, которой подключается трансформатор. Важно выбрать его с запасом по току, чтобы избежать перегрузки:

$$I_{р.мах} \leq I_{1ном};$$

$$I_{раб} = 876 \text{ A} \leq I_{мах} = 1000 \text{ A}$$

«Встроенные трансформаторы тока марки ТВГ– УЭТМ, параметры в таблице 6, созданы для работы внутри конструкции элегазовых баковых выключателей. Встроенные трансформаторы тока применяются для работы внутри конструкции других аппаратов, например, в конструкции элегазовых баковых выключателей, силовых трансформаторов, комплектных распределительных устройств или других, обеспечивающих изоляцию трансформатора от цепи высокого напряжения в электрических сетях переменного тока. Трансформатор предназначен для эксплуатации в районах, соответствующих климатическому исполнению в окружающей среде не содержащей агрессивных газов и паров в концентрациях при которой происходит разрушение изоляции» [11].

Таблица 6 - Условия выбора и проверки трансформатора тока марки ТВГ– 220

Условия выбора	Расчетные значения	Каталожные данные
$U_{н. \text{ выкл}} \geq U_{н. \text{ сети}}$	220 кВ	220 кВ
$I_{н. \text{ выклд}} \geq I_{\text{расч.}}$	$I_{\text{раб}}=876 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$
$i_{\text{дин}} > i_{\text{уд}}$	$I_{\text{уд}}=12,83 \text{ кА}$	$I_{\text{дин}}=64 \text{ кА}$
$I_{\text{терм.}} \times t_{\text{терм}} = B_{\text{к}}$	$B_{\text{к}} = 14,45 \text{ кА}^2 \times \text{с.}$	$I_{\text{тер}}^2 * t_{\text{кз}} = 99,23 \text{ кА}^2 \times \text{с.}$

Ограничители перенапряжения (ОПН) выбирают с учетом условий эксплуатации. При аномальных условиях эксплуатации ОПН должны выдерживать не только грозовые импульсы перенапряжений, но и повторяющиеся импульсы коммутационных перенапряжений, также кратковременные и длительные повышения напряжений различных частот. Они должны быть термически устойчивы при длительных воздействиях напряжения сети.

Ограничители перенапряжения выбирают по следующим параметрам:

- по расчетной величине повышения напряжения, это напряжение сопоставляют с характеристикой «напряжение- время» ОПН, если расчетная величина и длительность повышения напряжения превышают указанные для ОПН величины;
- по длительно допустимому напряжению, который определяет безаварийную работу ОПН;
- по требуемому защитному уровню коммутационных перенапряжений.

Ограничители перенапряжений должны надежно работать, не теряя термической устойчивости при воздействии атмосферных и коммутационных перенапряжений. Он должен быть взрывобезопасен при протекании токов короткого замыкания, если имеются внутренние повреждения. В таблице 7 указаны технические показатели ОПН220 кВ.

Таблица 7– Технические данные ОПНп-220 кВ

Характеристика ОПН 220 кВ		ОПНп – 220УХЛ1
Класс напряжения сети, кВ		220
Допустимое напряжение ОПН220, кВ		146
Номинальный разрядный ток,кА		10
Максимальное отстающее напряжение при импульсном токе 30/60мкс амплитудой,кВ:	250 кА, не более	140
	500 кА, не более	354
	1000А, не более	361
При грозовом импульсе тока 8/20мс амплитудой, кВ:	5кА, не более	258
	10кА, не более	442

Ограничители перенапряжения могут быть подключены [16]:

- между вводами силовых трансформаторов и землей;
- в нейтрале силовых трансформаторов 220кВ;
- нейтрале шунтирующих реакторов;
- на опорах линии электропередач, где не целесообразно устанавливать грозозащитные тросы;
- между фазами электрооборудования и линий.

Основная часть ограничителя перенапряжения является варистор, который относится к полупроводниковому элементу, в рабочем состоянии он имеет большое сопротивление, при перенапряжениях малым сопротивлением. Это достигается благодаря высоко нелинейной вольтамперной характеристике. Варистор изготавливают из керамических материалов, содержащих окись цинка и другие окислы металлов, спеченных вместе [10].

Выбор измерительных трансформаторов напряжения зависит от технических характеристик устройства и условий эксплуатации. Неправильный выбор ТН может привести к перегрузкам, высоким потерям энергии и аварийным ситуациям.

«Измерительные трансформаторы напряжения преобразуют высокое напряжение первичной обмотки в низкие напряжения вторичной обмотки,

которой подключаются измерительные приборы и цепи напряжения релейной защиты и автоматики» [20].

Основные параметры необходимы для выбора ТН [15]:

- номинальная полная мощность, которую может выдержать трансформатор, подбор мощности зависит от общей нагрузки на подстанции; и пиковых потребностей сети;
- уровень напряжения, важно выбирать соответственно параметрам сети, иначе ТН не сможет функционировать без дополнительных преобразователей;
- напряжение короткого замыкания, какое необходимо подать на первичную обмотку, чтобы во вторичной возник ток, равный номинальному при замкнутых выводах. Чем выше показатель напряжения короткого замыкания, тем более устойчив к перегрузкам;
- возможность регулировки входного напряжения, что позволяет адаптироваться к изменениям нагрузки и колебаниям входного напряжения;
- тип охлаждения, трансформаторы напряжения выделяют тепло во время работы и его необходимо отводить, чтобы предотвратить перегрев и снижение ресурса устройства;
- наличие защитных устройств, от токов короткого замыкания, перегрузки, перенапряжения.

Измерительные трансформаторы напряжения серии НАМИ, которые будут установлены в ОРУ 220 кВ являются антирезонансные. Они предназначены для передачи измерительной информации средствам измерений, устройствам защиты, автоматики, сигнализации и управления электрических сетях.

Принцип действия трансформаторов напряжения основан на законе электромагнитной индукции.

Измерительные трансформаторы изготавливаются в герметичном исполнении имеют широкий диапазон номинальных мощностей в классах

точности до 0,2, что позволяет исключить применение догрузочных резисторов. У трансформаторов напряжения марки НАМИ есть сильфонный компенсатор, обеспечивающий компенсацию изменений объема масла и работает как предохранительный клапан для сброса давления масла при внутренних повреждениях трансформатора. Компенсатор закрыт защитным колпачком с прорезью для визуального контроля уровня масла.

Измерительные трансформаторы напряжения серии НАМИ требуют минимальных затрат на обслуживание, при эксплуатации его достаточно контролировать уровень масла.

Принимаем к установке в ОРУ 220кВ три однофазных ТН типа НАМИ-220УХЛ1 с коэффициентом трансформации вторичных обмоток $220000 \sqrt{3} / 100 \sqrt{3} / 100 \sqrt{3} / 100 \sqrt{3}$, номинальной мощностью в классе точности 0,5 $S_{2ном} = 400$ ВА. В таблице 8 представлен перечень измерительных приборов, подключенных к ТН.

Таблица 8 – Перечень приборов, подключаемых к ТН ОРУ220кВ

Место установки и перечень приборов	Тип прибора	Полная мощность, ВА	Активная мощность, кВт	Реактивная мощность, ВАр
ЛЭП связи с системой:				
Ваттметр	Д – 335	1,5	27	0
Варметр	Д – 335	1,5	27	0
Счетчик ФИП	СА4-И681	2,0 3,0	14,4 27	33 0
Сборные шин:				
Вольтметр	Э-335	2	4	0
Вольтметр, рег.	Н-395	10	20	0
Ваттметр, рег.	Н-395	10	20	0
Частотметр	Н-397	7	14	0
Осциллограф	-	10	20	0
Итого:	-	-	174,3	33

Трансформатор выбирается по условиям [12]:

– по номинальному напряжению:

$$U_{уст} \geq U_{ном}$$

- по конструкции и способах соединения обмоток;
- по классу точности;
- по нагрузке на вторичной обмотке:

$$S_{вт.об} \geq S_{расч.}$$

где $S_{ном}$ – мощность трансформатора напряжения по классу точности, ВА;
 S_2 – нагрузка на вторичной обмотке ТН ,ВА.

Рассчитываем полную мощность нагрузки:

$$S_{расч. нагр} = \sqrt{P_{расч}^2 + Q_{расч}^2} \quad (21)$$
$$S_{наг} = \sqrt{173,4^2 + 33^2} = 176,5 \text{ ВА}$$

При классе точности ТН 0,5 мощность во вторичной сети составляет $S_{2ном} = 400 \text{ В.} \cdot 3 \cdot 400 = 1200 \text{ ВА} \geq 176,3 \text{ ВА}$ Выбранный трансформатор напряжения по классу точности выполняется.

При выборе шинных конструкций необходимо учитывать тип подстанции, число и мощность установленных силовых трансформаторов, уровни напряжения, количество питающих линий, гибкость и удобство в эксплуатации, безопасность в обслуживании.

Выбираем жесткую ошиновку для ПС 220 кВ, которая предназначена для выполнения электрических соединений между высоковольтными аппаратами открытых (ОРУ) и закрытых (ЗРУ) распределительных устройств. Жесткая ошиновка может применяться в виде сочетания жестких сборных шин с гибкими связями внутри ячеек. Ошиновка состоит из жестких шин трубчатого сечения, изготовленных из алюминиевого сплава и шинодержателей и

контактных связей. Электрический контакт между шинами и шинодержателями обеспечивается гибкими связями. Гибкая связь представляет собой хомуты с приваренными к ним кабельными гильзами, в которые при изготовлении запрессовывается алюминиевый провод. Число гибких связей в одном узле соединения должно быть не менее двух. Конструкция жесткой ошиновки ОРУ 220 кВ при длине пролетов между опорными изоляторами 15,4 м выполнена из трех отрезков — двух длиной по 3,5 м и одного — длиной 8 м, соединяемых сваркой. Технические характеристики жесткой ошиновки марки ОЖК-220/3150 представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Технические характеристики жесткой ошиновки ОЖК– 220/3150

Наименование параметра	Исполнение
Номинальное напряжение, кВ	220
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	252
Номинальный ток, А	3150
Номинальный кратковременный ток термической стойкости (3с),кА	50
Наибольший ток электродинамической стойкости (ударное значение $\leq 0,1с$),кА	125
Время протекания тока термической стойкости, с	3
Максимальный скоростной напор ветра, м/с	32
Допустимая толщина стенки гололеда, мм	20

Для электрического контакта между пролетами ошиновки используются шесть гибких связей. При монтаже ошиновки концы каждой гибкой связи запрессовываются в гильзах, соединенных сваркой с соединяемыми участками ошиновки. Принимаем марку ошиновки ОЖК-220/3150

Гибкие шины выбираются по условиям:

- по длительно допустимому току:

$$I_{\text{доп.}} \geq I_{\text{расч.}}$$

– по условию короны.

Выбираем гибкие шины 1СШ и 2СШ проводом марки 2×АС 300/39 (токопроводящая жила из алюминия сечением 300 мм², сердечник из стали сечением 39 мм²). Допустимый ток 1390 А. Максимальный рабочий ток 1СШ и 2СШ равен 867 А.

Рассчитываем гибкие шин на коронирование по условию:

$$0,9 \times E \geq 1,071 \times E_0 \quad (22)$$

где E – напряженность электрического поля около поверхности провода, кВ/см;

E_0 – максимальное значение критической напряженности электрического поля.

Рассчитываем максимальное значение критической напряженности электрического поля, при которой возникает разряд в виде короны.

$$E_0 = 30,3 \times m \times (1 + 0,299/r_{\text{пр}}) \quad (23)$$

где m — коэффициент, учитывающий шероховатость поверхности провода (для многопроволочных проводов 0,82);

$r_{\text{пр}}$ — радиус провода, см ($r_{\text{пр}} = 0,24$ см).

$$E_0 = 30,3 \times 0,82 \times (1 + 0,299/0,24) = 55,65 \text{ кВ/см}$$

Рассчитываем напряженность электрического поля у поверхности провода:

$$E = 0,345 \times U/r_{\text{пр}} \times \lg(D_{\text{ср}}/r_{\text{пр}}) \quad (24)$$

где U — линейное напряжение, кВ;

$D_{\text{ср}}$ — среднее геометрическое расстояние между проводами фаз, см;

D — расстояние между фазами, для напряжения 220 кВ, см; $D = 400$ см.

Рассчитываем расстояние между соседними фазами:

$$D = 1,26 \times D_{\text{ср}} \quad (25)$$

$$D = 1,26 \times 400 = 504 \text{ см.}$$

$$E = 0,345 \times 220 / 0,675 \times \text{Lg}(504 / 0,675) = 94,8 \text{ кВ/см.}$$

Выполняют проверку по условию отсутствия коронирования:

$$0,9 \times E \geq 1,071 \times E_0$$

$$0,9 \times 94,8 = 85,4 \text{ кВ/см} > 1,071 \times 55,65 = 59,6 \text{ кВ/см}$$

Выбранные шины по условию отсутствия коронирования удовлетворяют требованиям.

«Трансформатор собственных нужд обеспечивает питание оборудования, которое необходимо для функционирования подстанций, распределительных устройств. Особенностью трансформатора собственных нужд является то, что его не используют для передачи электрической энергии, а только для обеспечения работы вспомогательных систем- освещения, вентиляции, сигнализации, управления, защиты и автоматики. Его устанавливают на распределительных подстанциях, электростанциях, где требуется бесперебойное и качественное электроснабжение» [2].

На ПС 220/110/10 кВ «Княжево» установлены четыре трансформатора собственных нужд – 1ТСН марка ТМ160– 10/6,6кВ, 2ТСН, 3ТСН и 4ТСН мощность и марка ТМ400–10/6,6 кВ. ТСН подключены к РУ 10 кВ.

Собственные нужды ПС220/110/10 кВ имеют четыре секции 0,4 кВ. 3С-0,4 и 4С-0,4 питающиеся от 3ТСН и 4ТСН, секционированы 34САВ-0,4 с устройством АВР-0,4. АВР-0,4 действует на включение 34САВ-0,4 при исчезновении напряжения на 3(4)С-0,4 и отключении АВ-0,4 3(4)ТСН.

1(2)С-0,4кВ жёстко подключена к 3(4)С-0,4 кВ шинным мостом. 1(2)ТСН находятся в резерве. ПК-10 1(2)ТСН сняты, АВ-0.4 1(2)ТСН, 12СВ-0.4 отключены, оперативный ток снят.

Потребителями собственных нужд переменного тока ПС220/110/10 кВ являются:

- электродвигатели приводов коммутационного оборудования;
- освещение ОРУ220кВ;
- обогрев баков высоковольтных выключателей напряжением 110кВ и 220кВ;
- обогрев шкафов наружной установки;
- обогрев приводов разъединителей на напряжение 110 кВ и 220 кВ;
- нагрузки проектируемых панелей в ОПУ и РЩ 220 кВ;
- системы отопления, кондиционирования, освещения, сигнализации.

«Распределительные сети электроснабжения проектируемого оборудования ОРУ220 кВ подстанции выполняются кабелем с поливинилхлоридной изоляцией, пониженной пожароопасности в хладостойком исполнении (нг(А)— ХЛ). Сечение кабелей распределительной сети выбираются по расчетному току и проверяются по допустимые потери напряжения и по условию нагрева» [3].

Рабочее освещение ОРУ 220 кВ и ОРУ 110 кВ осуществляется прожекторами со светодиодными лампами. Монтаж прожекторов предусмотрено выполнить на специализированных мачтах - прожекторных мачтах.

Рабочее освещение территории открытого распределительного устройства осуществляется девятью прожекторами мощностью с номинальной мощностью 400 Вт и тремя прожекторами мощностью с номинальной мощностью 1000 Вт.

Управление системой рабочего освещения открытого распределительного устройства ПС 220/110/10 кВ Княжево выполняется из здания РЩ 220 и с щитков прожекторных мачт.

4 Расчет системы заземления и молниезащиты ПС 220/110/10 кВ

Заземление ПС220/110/10 кВ делается для защиты обслуживающего персонала от поражения электрическим током при появлении его на открытых токопроводящих частях в нормальных и аварийных режимах работы. Обеспечивает электромагнитную совместимость оборудования, чтобы уровни напряжений и токов, действующих при коротких замыканиях и коммутациях, не превышали допустимых значений. Заземление ПС 220кВ состоит из вертикальных и горизонтальных заземлителей, все заземляющие устройства зданий и сооружений должны быть объединены в одно общее заземляющее устройство.

Размещение заземлителей должно обеспечить равномерное распределение электрического потенциала на площади ПС220/110/10 кВ, занятой электрооборудованием. Для этого на территории открытого распределительного устройства подстанции прокладывают заземляющие полосы на глубине 0,5-0,8м вдоль рядов оборудования и в поперечном направлении, образуя заземляющую сетку.

Заземляющие проводники присоединяют к оборудованию при помощи сварки. Сварное соединение заземляющих проводников с оборудованием должно выполняться не менее чем двумя сварными швами длиной не менее 50 мм или болтовым соединением. Заземляющее устройство ПС220/110/10 кВ предусмотрено горизонтальными заземлителями сечением 5×50 мм и вертикальным заземлителем диаметром 16мм и присоединяется к контуру заземления. Сопротивление заземляющего устройства в любое время года не превышает 0,5 Ом, при этом напряжение на заземляющем устройстве не превышает 5000 В.

«Вертикальные заземлители рекомендуют прокладывать вдоль осей электрооборудования на глубине 0,5—0,8м от поверхности земли и на расстоянии 0,8—1,0 м от фундаментов оборудования. Горизонтальные заземлители прокладывать в удобных местах между оборудованием на глубине

прокладки продольных заземлителей базовой конструкции. Расстояние между продольными и поперечными горизонтальными заземлителями не должно превышать 30м» [15].

На территории ПС 220/110/10 кВ размещены:

- ОРУ220 кВ;
- ОРУ 110 кВ;
- здания ОПУ 220кВ; ОПУ 110 кВ;
- вспомогательные и хозяйственные сооружения;
- автотрансформаторы 220/110/10 кВ АТ-1, АТ-2;
- трансформаторы собственных нужд ТСН-1 и ТСН-1 10/0,4 кВ;
- молниеотвод и прожекторные мачт.

Молниеприемники на порталах ОРУ 220/110 кВ.

Длина подстанции ПС 220/110/10кВ-265м, ширина-54м, длина вертикальных заземлителей—5м, глубина заложения горизонтальных электродов-0,7м.

Удельные сопротивления верхнего слоя грунта супесок и равно $\rho_1 = 400 \text{ Ом/м}$ и нижнего слоя грунта суглинок $\rho_2 = 100 \text{ Ом/м}$.

Рассчитываем площадь подстанции:

$$S=A \times B=265 \times 154 = 40800 \text{ м}^2$$

Рассчитываем периметр сетки:

$$P= 265 \times 2 + 154 \times 2 = 838 \text{ м}$$

Принимаем заземляющая сетка состоит из 2 продольных полос длиной 180 м и 17 поперечных полос длиной 30 м.

Рассчитываем площадь сетки:

$$S = 30 \times 180 = 5400 \text{ м}^2,$$

Суммарная длина вертикальных заземлителей всей подстанции:

$$L_B = 2 \times 265 \times 5 \times 154 = 40810 \text{ м}$$

Суммарная длина горизонтальных заземлителей всей подстанции:

$$L_r = 2 \times 265 \times 0,7 \times 154 = 57154 \text{ м}$$

Рассчитываем число вертикальных заземлителей:

$$n = P/a \quad (26)$$

где P — периметр сетки заземлителя, м;

a — расстояние между вертикальными заземлителями, 10 м.

$$n = 838/10 = 84 \text{ шт}$$

Рассчитываем удельное сопротивление верхнего слоя грунта:

$$\rho = K_c \times \rho_1 \quad (27)$$

где K_c — коэффициент сезонности, 1,25:

ρ — удельное сопротивление верхнего слоя грунта Ом/м.

$$\rho = 1,25 \times 400 = 500 \text{ Ом/м}$$

Рассчитываем однофазный ток короткого замыкания:

$$I^{(1)}_k = 1,5 \times I^{(3)}_k \quad (28)$$

где $I^{(3)}_k$ — ток трехфазного короткого замыкания, принимаем 12480 А.

$$I^{(1)}_k = 1,5 \times 12480 = 18720 \text{ А} = 18,72 \text{ кА}$$

Рассчитываем коэффициент, определяемый по сопротивлению тела человека:

$$\beta = R_{\text{ч}} / (R_{\text{ч}} + R_{\text{с}}) \quad (29)$$

где $R_{\text{ч}}$ — сопротивление тела человека, $R_{\text{ч}} = 1000 \text{ Ом}$;

$R_{\text{с}}$ — сопротивление тока растекания ступней человека, $R_{\text{с}} = 225 \text{ Ом}$.

$$\beta = 1000 / (1000 + 225) = 0,748$$

Рассчитываем коэффициент напряжения прикосновения:

$$K_{\text{п}} = M \times \beta / (L \times L_{\text{В}} / a)^{0,45} \quad (30)$$

где $L_{\text{В}}$ — длина вертикального заземлителя, принимаем 5м;

S — площадь ОРУ 220 кВ, м^2 ;

L — общая длина сетки, м ;

M — параметр, зависящий от соотношения ρ_1 / ρ_2 , принимаем 0,8.

$$K_{\text{п}} = 0,8 \times 0,748 / (5 \times 50 / 10 \times 202)^{0,45} = 0,174$$

Рассчитываем потенциал заземлителя:

$$U_{\text{з}} = U_{\text{пр.доп}} / K_{\text{п}} \quad (31)$$

где $U_{\text{пр.доп}}$ - проходное допустимое напряжение, принимаем 200 В;

$K_{\text{п}}$ - коэффициент напряжения прикосновения.

$$U_{\text{з}} = 200 / 0,174 = 1149 \text{ В} \leq 10000 \text{ В}$$

Рассчитываем допустимое сопротивление заземляющего устройства:

$$R_{\text{з}} = U_{\text{з}} / I_{\text{по}}^{(1)} \times K_{\text{с}} \quad (32)$$

где $U_{\text{з}}$ — потенциал заземлителя, В;

$I_{\text{к}}^{(1)}$ — ток однофазного короткого замыкания, кА;

$K_{\text{с}}$ — коэффициент стекания, принимаем 0,5.

$$R_3 = 1149 / 0,5 \times 12480 = 0,184$$

Рассчитываем число ячеек сетки:

$$m = L / 2 \times \sqrt{S} \quad (33)$$

$$m = 5040 / 2 \times 202 - 1 = 11,5$$

Принимаем число ячеек сетки 12.

Рассчитываем длину полос горизонтального заземлителя:

$$L = 2 \times \sqrt{S} \times (m + 1) \quad (34)$$

где m — число ячеек сетки, шт.

$$L_T = 2 \times 202 (12 + 1) = 5252 \text{ м}$$

Рассчитываем длину ячеек сетки:

$$a_{\text{расч}} = I_{\text{расч}} / m \quad (35)$$

где $I_{\text{расч.}}$ — расчетный ток, А;

m — сторона ячейки, м.

$$a_{\text{расч.}} = 876 / 2 \times 24 = 18 \text{ м}$$

Рассчитываем число вертикальных заземлителей:

$$n_B = 4 \times \sqrt{S} / a_{\text{расч}} \quad (35)$$

$$n_B = 4 \times 202 / 18 = 44,8$$

Принимаем 46 шт.

Рассчитываем общую длину вертикальных заземлителей модели

$$L^1_B = I_{\Pi} \times n_B \quad (36)$$

$$L_B^1 = 5 \cdot 46 = 230 \text{ м}$$

Рассчитываем относительную глубину заземлителей:

$$t_{\text{отн}} = I_B + t / \sqrt{S} \quad (37)$$

где t - глубина горизонтальных заземлителей, м.

$$t_{\text{отн.}} = 5 + 0,7 / 202 = 0,028 \text{ м}$$

Рассчитываем сопротивление сложного заземлителя:

$$A = 0,444 - 0,84 \times (I_B + t) / \sqrt{S} \quad (38)$$

$$A = 0,444 - 0,84 \times (5 + 0,7) / 202 = 0,42 \text{ Ом}$$

Рассчитываем эквивалентное сопротивление:

$$R_{\text{экв.}} = 2,15 \times P_H \quad (39)$$

$$R_{\text{экв.}} = 2,15 \times 30 = 64,5 \text{ Ом}$$

Рассчитываем сопротивление вертикальных заземлителей:

$$R_3 = A \times (R_{\text{экв.}} / \sqrt{S}) + (R_{\text{экв.}} / L + L_B) \quad (40)$$

$$R_3 = 0,42 \times 64,5 / 202 + 64,5 / 5040 + 320 = 0,146 \text{ Ом м}$$

Рассчитываем сопротивление заземляющего устройства с учетом естественных заземлителей:

$$R_3 = R \times R_e / R + R_e \quad (41)$$

где R_e - сопротивление естественного заземлителя - трос опора, принимаем 2 Ом.

$$R^1_3 = 0,146 \times 2/0,146 + 2 = 0,136 \text{ Ом}$$

Рассчитываем напряжение прикосновения [7]:

$$U_{\text{пр}} = K_{\text{п}} \times I^{(1)}_{\text{по}} \times R_3 \times 0,5 \quad (42)$$

$$U_{\text{пр}} = 0,174 \times 12480 \times 0,136 \times 0,5 = 148 \text{ В} \leq 200$$

Заземляющее устройство отвечает требованиям безопасности.

От прямых ударов молнии ПС220/110/10 кВ осуществляется с помощью молниеотводов, совмещенных с конструкциями ОРУ и молниеотводами, установленными на прожекторных мачтах [12]. Растекание тока молнии по линиям заземления должно быть в двух направлениях. Вертикальные молниеотводы должны быть длиной 3-5 м и должны быть установлены на расстоянии не менее длины электрода от стойки. Высоковольтное оборудование и ошиновка ПС входит в зону защиты молниеотводов, устанавливаемых на порталах и прожекторных мачтах с молниеотводами.

Применяем двойной стержневой молниеотвод, зона защиты равна 150 м.

Рассчитываем радиус действия молниеотвода для ОРУ-220 кВ:

$$h_c = h_a \times 1,6 / (1 + h_x / h) \times p \quad (43)$$

где h — высота молниеотвода, м;

h_a — активная высота молниеотвода, м;

p — коэффициент, равный $p=1$ для молниеотводов при $h < 30$ м; $p=5,5/h$ для молниеотводов при $h > 30$ м.

$$h_c = 13,5 \times 1,6 / (1 + 16,5/30) \times 1 = 13,9 \text{ м}$$

Для ОРУ 220 кВ для молниезащиты принимается 14 молниеотводов.

Рассчитываем ширину узкой части действия двух молниеотводов:

$$B_x = 4 \times r_x \times (7 h_a - a) / 14 h_a - a \quad (44)$$

$$B_x = 4 \times 13,9 \times (7 \times 13,5 - 62) / 14 \times 13,5 - 62 = 14,2 \text{ м}$$

Выполнен расчет систем заземления и молниезащиты объекта выпускной квалификационной работы результаты которого соответствуют требованиям безопасности и нормам проектирования подстанций [14].

Для защиты территории открытого распределительного устройства 220 кВ использованы двух стержневые отдельно стоящие молниеотводы высотой 30 м. Всего к установке принято 14 двухстержневых молниеотвода.

При расчете системы заземления учтены сопротивления естественных заземлителей, а также сопротивления спроектированного контура заземления. Принято выполнить контур заземления в виде сетки по территории ОРУ с учетом необходимости растекания токов молний и предотвращению обратных перекрытий. В результате система заземления выполнена с вертикальными и горизонтальными заземлителями. В результате расчетов напряжение прикосновения соответствует требованиям и не превышает 200 В.

5 Феррорезонансные явления и мероприятия защиты

Наличие емкостных и индуктивных сопротивлений, которые способны образовывать колебательные контуры в момент переключений вызывает появление феррорезонанса.

Индуктивно—емкостные колебательные контуры создают элементы с большими индуктивными сопротивлениями—все вид трансформаторов, реакторы, линии электропередач, системы шин, батареи конденсаторов [1].

Большой индуктивностью обладают электромагниты и магнитопроводы из ферромагнитных материалов, которые имеют нелинейные вольт-амперные характеристики (рисунок 4).

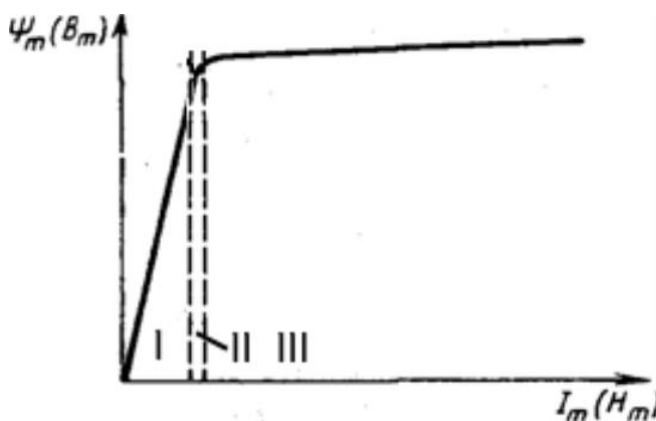


Рисунок 4- Кривая намагничивания магнитопроводов

Первый участок на характеристике имеет линейную зависимость, где намагничивание идет пропорционально с увеличением тока.

Второй участок характеристики показывает, что увеличением тока насыщение магнитопровода замедляется.

Третий участок характеристики, показывает, что с увеличением тока насыщение магнитопровода не зависит от тока и он полностью насыщен.

Нагруженный трансформатор имеет малую величину индуктивного и активного сопротивлений, которые образуют резонансный контур, когда

индуктивный элемент с нелинейной вольтамперной характеристикой подключается последовательно к ёмкостному элементу, напряжение характеризуется как активно-индуктивное.

В индуктивных сопротивлениях напряжение опережает ток на угол 90^0 , а в емкостном сопротивлении напряжение отстает от тока на угол 90^0 . Когда индуктивное сопротивление достигает пиковых значений магнитопровод насыщается, а на емкостном сопротивлении напряжение продолжает возрастать. Резонанс наступит при равенстве сопротивлений индуктивного и емкостного ($X_L = X_C$).

Суть феррорезонанса – это скачкообразное изменение напряжения и тока в цепи, связанное с индуктивностью катушки с ферромагнитным сердечником, имеющий нелинейную вольтамперную характеристику и при определенном значении тока наступает резонанс.

Феррорезонанс может быть:

- основным, когда колебания тока и напряжения имеют одну частоту;
- квазипериодическим, который характеризуется непериодическим сигналом, но его спектр не прерывный.

Причины появления феррорезонанса:

- неполнофазный режим работы сети, при котором на поврежденной фазе наводится напряжение за счет емкости связи с другими фазами;
- взаимоиנדукция отключенной и подключенной воздушных линий электропередачи [3];
- оперативные переключения на шинах ПС;
- отключение трансформаторов на холостом ходу;
- несимметрия емкостей из-за неравномерного покрытия изоляторов льдом или загрязнением.

При феррорезонансе в элементах сети возникают перенапряжения, которые вызывают, перегрев обмоток трансформаторов, пробой изоляции, сверхток, искажения напряжения, акустический шум, возникающий из-за деформации магнитопровода трансформатора.

Методы защиты от феррорезонанса:

- исключение неполнофазных режимов путем настроек защит;
- применение быстродействующих АПВ, при этом уменьшается время нахождения в опасном режиме;
- заземление нейтрали через резистор или дугогасящий реактор, что позволяет снизить риск резонанса;
- установка демпфирующих резисторов в цепи вторичных обмоток трансформатора напряжения;
- применение антирезонансных трансформаторов напряжения;
- режим резистивного заземления нейтрали трансформаторов;
- использование трансформаторов нулевой последовательности, которые закрепляются на трансформаторах со стороны выводов первичной обмотки их большое сопротивление предотвращает возникновение устойчивого феррорезонанса;
- —закороченные дополнительные вторичные обмотки фазных трансформаторов напряжения, которые соединяются в замкнутый треугольник и препятствуют насыщению магнитопровода трансформатора. Сопротивление фазных трансформаторов близко к постоянному, поэтому возникновение феррорезонанса маловероятно;
- использование конденсаторов связи.

Для защиты от феррорезонансных явлений проводят аппаратные и оперативные мероприятия, направленные на изменение емкости и индуктивности элементов сети. Например, используют конденсаторы связи для изменения емкости систем шин.

Анализируя причины феррорезонансных явлений, пришли к выводам для их устранения эффективными методами является установка антирезонансного трансформатора напряжения и использование конденсаторов связи для изменения емкости системы шин. Увеличение емкостного сопротивления шин через подключения к ним батарей

конденсаторов связи допустимо, когда другие мероприятия по тем или иным причинам не могут быть применены.

Применение измерительных трансформаторов напряжения типа НАМИ– 220 УХЛ1– является эффективным способом устранения феррорезонанса. Антиферрорезонансный однофазный двухступенчатый трансформатор напряжения индуктивного типа имеет преимущества над трансформатором, который был установлен до реконструкции ОРУ-220 кВ (НКФ-220) наличием антиферрорезонансности и защиты внутренней изоляции посредством многообъемного масляного затвора (вместо силикагелевого патрона у НКФ-220). НАМИ– 220 УХЛ1 имеет несколько типов исполнения с различным количеством обмоток, классов точности и номинальной мощности.

Особенностью конструкции трансформатора напряжения НАМИ– 220 УХЛ1 является то, что магнитопровод выполнен из толстолистовой конструкционной стали, которая обеспечивает значительное увеличение активных потерь при больших индукциях в магнитопроводе, что позволяет выдерживать длительное воздействие тока в обмотке.

Из-за этой особенности трансформаторы напряжения типа НАМИ не только сами не вступают в феррорезонанс с емкостью сети, но и выдерживают феррорезонансное повышение напряжения, вызванные намагничивающим током других устройств.

Трансформаторы напряжения марки НАМИ (рисунок 5) напряжением 220 кВ имеют каскадную конструкцию, что не требует дополнительных затрат при монтаже и упрощает их транспортировку.

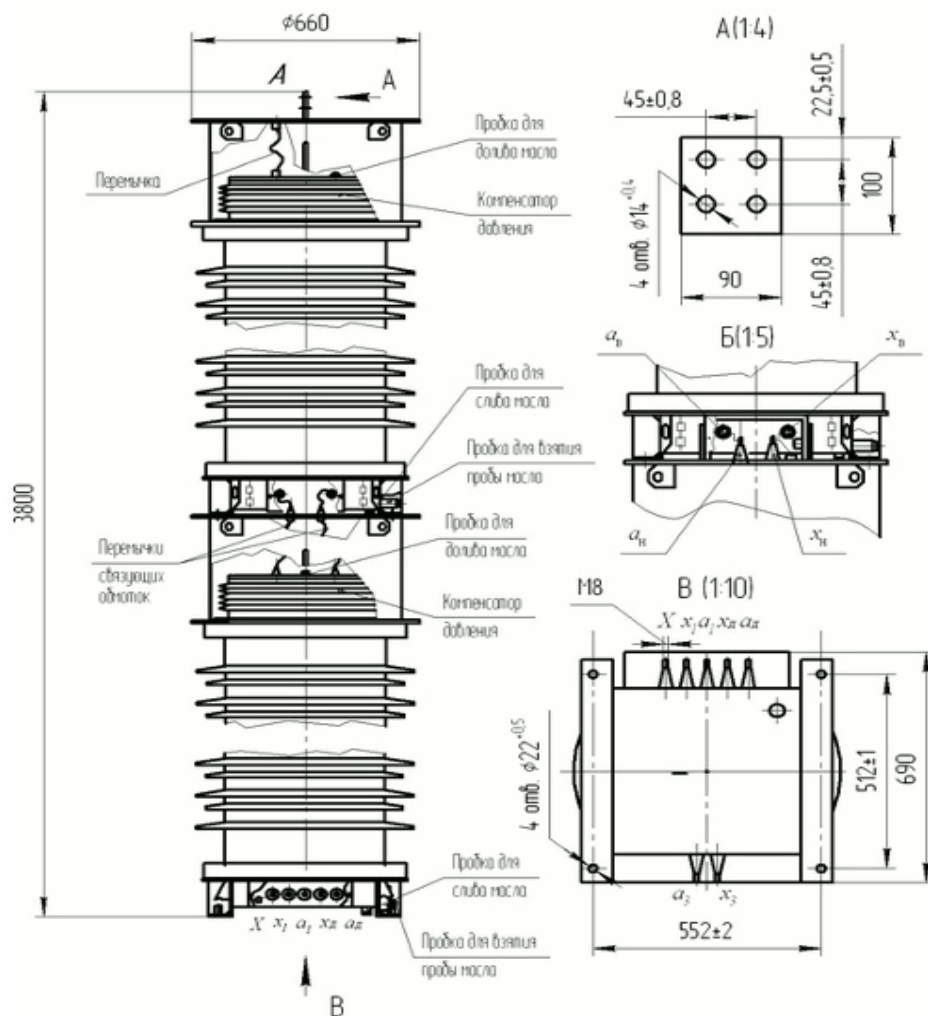


Рисунок 5– Трансформатора напряжения типа НАМИ– 220 УХЛ

Антирезонансный трансформатор напряжения типа НАМИ имеет двухкаскадную систему (рисунок 6). В первом каскаде имеет первичную, выравнивающую, связующую, во втором каскаде вторичную основную №3 и вторичную дополнительную №2. Обмотки изолированы бумажно-масляной изоляцией. Линейный вывод А первичной обмотки расположен на металлическом расширителе верхней ступени. Заземляемый ввод Х первичной обмотки и вводы основной вторичной обмотки №1 (a_i-x_i) и дополнительной вторичной обмотки №2 (a_d-x_d) обмоток расположены в коробке выводов нижней ступени. Выводы основной вторичной обмотки №3 (a_3-x_3) находятся в коробке выводов, расположенной с противоположной стороны коробки выводов №1 и №2. Вторичные основные обмотки обеспечивают номинальный

коэффициент трансформации–2200, дополнительная – 2200/V3. Вывод X первичной обмотки и выводы вторичных обмоток ($a_i - x_i$), ($a_3 - x_3$) и ($a_d - x_d$) расположены на нижнем фланце трансформатора. Выводы X, ($x - i$), x_3 и x_d заземляются.

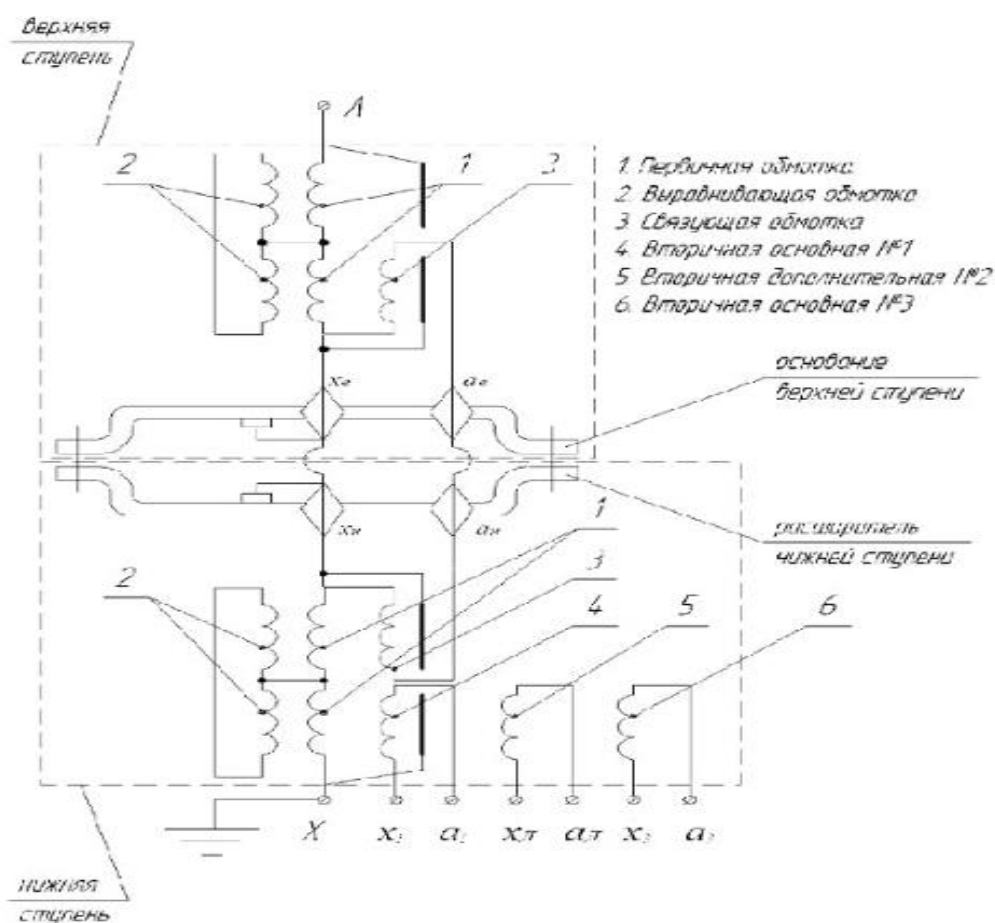


Рисунок 6– Схем соединения обмоток трансформатора напряжения антирезонансного марки НАМИ-220 УХЛ1

Второй метод устранения феррорезонанса использование конденсаторов связи для изменения емкости системы шин. Увеличение емкостного сопротивления шин через подключения к ним батарей конденсаторов связи. Конденсаторы связи подключают к шинам, чтоб увеличить суммарную емкость, что позволяет вывести схему из зоны, опасной для возникновения

феррорезонанса и предотвратить повреждение трансформаторов напряжения и отключению шин.

Для устранения феррорезонансного процесса можно использовать высокочастотную связь (ВЧ– связь) на ПС 220/110/10 кВ, ее можно использовать косвенно для подавления феррорезонанса.

Условия для использования конденсаторов связи:

- суммарная ёмкость конденсаторов должна быть такой, такой чтобы достаточно было для вывода схемы из зоны феррорезонансного процесс;
- конденсаторы к шинам должны подключаются без выключателей. Если в цепи конденсатора имеются выключатель, то должно быть предусмотрено отключение их при отключении систем шин;
- – конденсаторы не должны вносить недопустимые искажения в режим работ трансформатора напряжения, измерительных цепей, релейной защит и автоматики;
- – нагрузка на трансформатор напряжения, создаваемая конденсаторами и время приложения не должны превышать предельных значений, установленных техническими условиями на трансформаторы.

Конденсаторы связи 220 кВ – важнейшие элементы современных линий электропередач, обеспечивающие передачу сигналов управления и телеизмерения.

Конденсатор связи 220 кВ (рисунок 7) пропускает высокочастотные сигналы частотой до 1,5 МГц при одновременной гальванической развязке от опасного напряжения промышленной частоты 50 Гц. Конструктивно конденсатор состоит из следующих основных узлов: Конденсатор представляет собой диэлектрик (пленочный или бумажно-пленочный), фарфоровый корпус с высоковольтными вводами, предохранительное устройство, изолирующая подставка или вывод для заземления. Конденсатор имеет два вывода - один подключается к земле через высокочастотный

трансформатор, а другой – к проводам линии электропередач при этом обеспечивается разделение высокочастотного сигнала и низкочастотного напряжения сети. Конденсатор связи 220 кВ выполняет функцию своеобразного фильтра.

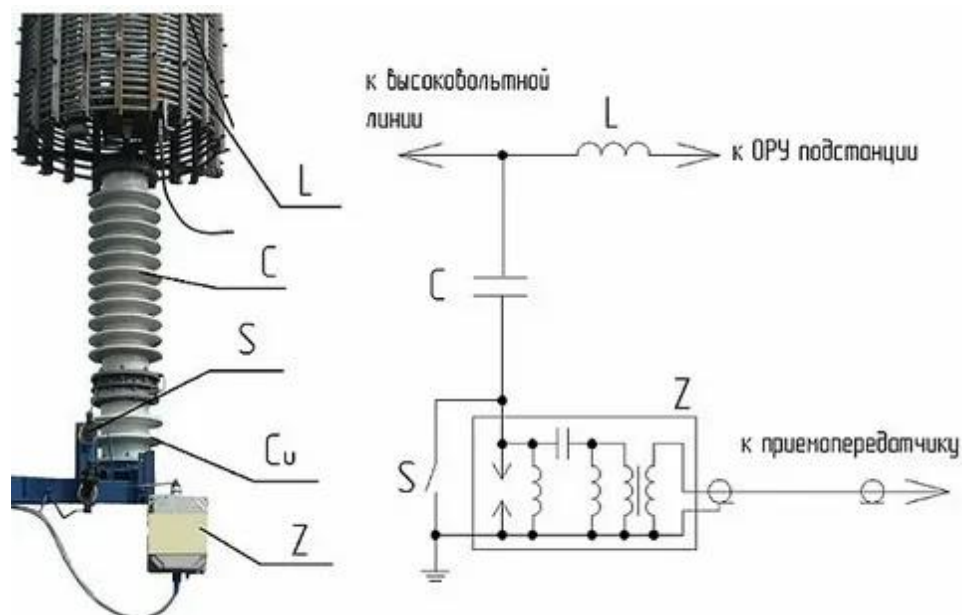


Рисунок 7 – Присоединение ВЧ-связи по схеме «фаза- земля»

На рисунке 7 изображены и обозначены:

- L – катушка индуктивности;
- C – емкость конденсатора связи;
- Cu – подставка для конденсатора;
- Z – фильтр присоединения с индуктивно-емкостными связями;
- S – разъединитель заземляющими ножами.

Высокочастотная ВЧ– подавая сигнал в цепь может вносить дополнительные потери и нарушения для условия резонанса, что позволит косвенно повлиять на феррорезонанс. Также ВЧ – связь может снижать амплитуду колебаний резонансной частоты, так как там есть демпфированные резисторы.

Так же ВЧ – связь может вносить дополнительную емкость и индуктивность, что тоже изменит резонансные свойства системы. ВЧ – связь не всегда эффективна, особенно при низкочастотном феррорезонансе (5-1000 Гц).

В распределительных устройствах 110 –500 кВ конденсаторы связи подключают к системам шин, чтобы предотвратить феррорезонанс при отключении секции шин с электромагнитными трансформаторами напряжения и при неполнофазных включений ненагруженных силовых трансформаторов и изолированной невидалью.

Делаем вывод: для снижения феррорезонанса лучше всего использовать:

- демпфирующих сопротивлений;
- заземление нейтрали;
- применение антирезонансных трансформаторов напряжения.

Применение конденсаторов ВЧ- связи можно применять, но необходимо учесть их стоимость и то что они имеют непродолжительный срок службы.

В схемах с антирезонансными трансформаторами напряжения можно использовать, как дополнительное устранения феррорезонанса конденсатор связи и устанавливать их на шинах, что позволит полностью предотвратить процесс при коммутации холостых ошиновок.

Заключение

При выполнении бакалаврской работы разработаны мероприятия по реконструкции электрической части узловой подстанции ПС 220/110/10 кВ Княжево, в частности ОРУ -220 кВ.

Сделан анализ электрической части узловой подстанции до и после реконструкции, с описанием оборудования, сделано обоснование технических решений по реконструкции ОРУ 220 кВ. После анализа нормативных документов было установлено, что силовое оборудование открытого распределительного устройства ОРУ 220 кВ необходимо модернизировать, так большая часть имеет физический и моральный износ.

Применение современного оборудования позволит повысить качество передаваемой электроэнергии, надежность, бесперебойность питания потребителей.

В ходе работы для хорошей работоспособности подстанции ПС 220/110/10 кВ Княжево проведены технические решения при реконструкции ОРУ 220 кВ:

- для защиты питающих линий ВЛ-220 кВ от аварийных режимов и коммутации выбраны элегазовые трехполюсные выключатели с встроенными трансформаторами тока марки ВЭБ– УЭТМ;
- для коммутации и создания видимого разрыва в цепи выбраны разъединители марки РГ – 220/1000 (УХЛ1) с приводом горизонтально-поворотного типа главных и заземляющих ножей;
- для защиты оборудования ОРУ 220 кВ от атмосферных и коммутационных перенапряжений выбрали ограничители перенапряжения нелинейные, со счетчиком срабатываний марки ОПН-П 220 кВ;
- после реконструкции предложено заменить трансформатор напряжения марки НКФ -220-58У1 на антирезонансный, емкостного

типа марки НАМИ-220УХЛ1, который может снизить феррорезонанс на ПС220 кВ.

Рассчитано заземление и молниезащита ОРУ 220 кВ подстанции ПС 220/110/10 кВ Княжево. Все решения при реконструкции проверены согласно принятых методик и нормативных документов.

Важным решением при реконструкции ПС 220/110/10 кВ Княжево, является рассмотрение и решение вопроса устранения феррорезонансных явления из-за наличия ёмкостных и индуктивных сопротивлений, которые способны образовывать колебательные контуры в моменты переключений. Такими процессами обладают автотрансформаторы, силовые трансформаторы, линейные вольтодобавочные трансформаторы, трансформаторы напряжения, шунтирующие реакторы и оборудование, оснащённое массивными обмотками.

Описаны причины феррорезонансных явлений, способы их снижения, мероприятия — это применение демпфирующих сопротивлений, заземление нейтрали, применение антирезонансных трансформаторов напряжения. А также можно использовать высокочастотную связь (ВЧ_связь) установленную на ПС 220/110/10 кВ косвенного для подавления феррорезонанса, применение конденсаторов ВЧ— связи можно применять, но необходимо учесть их стоимость и то что они имеют непродолжительный срок службы.

Таким образом в ходе выполнения бакалаврской работы решены задачи по реконструкции ОРУ 220 кВ на ПС 220/110/10 кВ Княжево, что позволит повысить качество электроснабжения потребителей.

Список используемых источников

1. Арбузов Р., Овсянников А. Современные методы диагностики воздушных линий электропередачи. Новосибирск: Наука, 2020. – 180с.
2. Инструкция по эксплуатации цита собственных нужд ПС220 кВ»Беркут»[Текст]: утвержден ПАО» Россети»
3. Нормы технологического проектирования воздушных линий электропередачи напряжением 35– 750 кВ [Текст]:СТО 56947007–29.240.55.016– 55 2008:утв Приказом ПАО «Россети» 03.02.2022.
4. Нормы технологического проектирования подстанции переменного тока с высшим напряжением 35– 750 кВ.[Текст]:СТО 56947007– 29.240.10.028– 2019: утв. Приказом ПАО «Россети»
5. Основные положения (Концепция) технической политики в электроэнергетике России на период до 2030г. [Текст]: утв. ПАО РАО «ЕЭС России» 2008:ввод в действие 2008.– 90с.
6. Положение о технической политике ПАО»Россети»[Текст]: утв. Председатель Совета Директоров ПАО «Россети».
7. ПОТ РМ – 016– 2001, РД 153– 34.0– 03.150– 00 Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок (с изменениями и дополнениями) [Текст]: утверждены постановлением Министерства труда и социального развития Российской Федерации от 5.01.2001.приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 27.12.2000. N 163: введена 01.07.2001.– 42с.
8. Пояснение к нормальной схеме электрических соединений ПС 500 кВ Беркут [Текст]: утвержденный заместителем директора главным инженером филиала ПАО «ФСК ЕЭС» А. В. Лазовский 2022 г. – 36 с.
9. Правила устройства электроустановок [Текст]: (ПУЭ).– [п.2.5.1257-е изд.]– М.: Мин.Энегр. Росси,2012.– 330с
10. Правила устройства электроустановок[Текст]: (ПУЭ).– [7-е изд.]– М.: Мтн.Энерг. России.2012.– 330с.

11. РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания - М.: Энергия, 2018. 69 с.
12. Рожкова Л.Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций: Учебник для студентов учреждений среднего профессионального образования. М.: ИЦ Академия, 2018. 448 с.
13. СНиП ..02.05– 87. Строительные нормы и правила. Фундамент машин с динамическими нагрузками[Текст]: утверждено Управлением стандартизации и технических норм в строительстве Госстроя 1998.– 37с.
14. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. 4-е изд., перераб. и доп. М.: ЭНАС, 2018. 312 с.
15. СТО 56947007-29.130.15.114-2012. ФСК ЕЭС руководящие указания по проектированию заземляющих устройств подстанций напряжением 6-750 кВ [Текст]: утв. Сов-ом директоров ОАО «Россети» 23.10.2013: ввод в действие с 27.12.2013. – М: ФСК ЕЭС, 2013. – 196 с. (дата обращения: 26.05.2023).
16. СТО 56947007-29.240.10.248-2017. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35 - 750 кВ (НТП ПС) [Текст] : официальное издание. – М. : Энергоатомиздат, 2021. – 135 с.
17. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанции 35– 750 кВ. Типовые решения [Текст]: СТО 56947007– 29.240.30.010.– 2008: утверждены приказом ОАО «ФСК ЕЭС»от 16.06.2010 №421: введен в действие 16.06.2010.– М.: ФСК ЕЭС,2010.– 32с.
18. Фролов Ю. М., Шелякин В. П. Основы электроснабжения: Учебное пособие. Москва: Лань, 2018. 480 с.
19. Хорольский В.Я., Таранов М.А. Надежность электроснабжения: Учебное пособие. Москва: Форум, Инфра-М, 2019. 128 с.
20. Шестаков Д.Н., Помялов С.Ю. Релейная защита трансформаторов с использованием микропроцессорного устройства «Сириус-Т. Курган: КГУ, 2011. 55 с.