

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
**«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО  
«Сибирский федеральный университет»  
институт

«Электроэнергетика, машиностроение и автомобильный транспорт»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ А.С. Торопов  
подпись                      инициалы, фамилия  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

код – наименование направления

Реконструкция подстанции 110/6 кВ «Екатерининская» ПАО «Россети Урал»  
тема

Руководитель	_____	доцент, к.т.н.	<u>А.В. Коловский</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		<u>А.С. Попков</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Нормоконтролер	_____		<u>И.А. Кычакова</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия

Абакан 2024

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
**«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО  
«Сибирский федеральный университет»  
институт

«Электроэнергетика, машиностроение и автомобильный транспорт»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ А.С. Торопов

подпись                      инициалы, фамилия

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 г.

**ЗАДАНИЕ**  
**НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**  
**в форме бакалаврской работы**

Студенту Попкову Анатолию Сергеевичу  
(фамилия, имя, отчество)  
Группа ЗХЭн 19-1 (3-19) Направление 13.03.02  
(код)  
Электроэнергетика и электротехника  
(наименование)

Тема выпускной квалификационной работы: Реконструкция подстанции 110/6 кВ  
Екатерининская ПАО Россети Урала

Утверждена приказом по институту № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Руководитель ВКР Коловский А.В., доцент кафедры ЭМиАТ

(инициалы, фамилия, должность и место работы)

Исходные данные для ВКР \_\_\_\_\_ план расположения существующего оборудования, его  
характеристики, перечень потребителей электроэнергии.

Перечень разделов выпускной квалификационной работы:

Введение

1 Теоретическая часть

1.1 Характеристика подстанции 110/6 кВ «Екатерининская» ПАО «Россети Урал»

1.2 Обоснование реконструкции подстанции

2 Аналитическая часть

2.1 Анализ перспективных конструкций основных электроустановок и  
электрооборудования подстанций на напряжение 110 кВ

2.2 Анализ перспективных конструкций основных электроустановок и  
электрооборудования подстанций на напряжение 6 кВ

3 Практическая часть

3.1 Питающая линия

3.2 Выбор трансформаторов

3.3 Расчет токов КЗ

3.4 Выбор оборудования 110 кВ

3.5 Выбор оборудования 6 кВ

3.6 Выбор ТСН

3.7 Выбор системы оперативных токов

Заключение

Перечень обязательных листов графической части

1. Однолинейная схема ПС до реконструкции

2. Однолинейная схема ПС после реконструкции

3. План и разрез ПС после реконструкции

Руководитель ВКР

/ А.В. Коловский

(подпись, инициалы и фамилия)

Задание принял к исполнению

/ А.С. Попков

(подпись, инициалы и фамилия студента)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 г.

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Реконструкция подстанции 110/6 кВ «Екатерининская» ПАО «Россети Урал» содержит 59 страниц текстового документа, 36 использованных источников, 3 листа графического материала.

ПОДСТАНЦИЯ, СИЛОВОЙ ТРАНСФОРМАТОР, ЛИНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ, ТОК КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ, ТРАНСФОРМАТОР ТОКА, ТРАНСФОРМАТОР НАПРЯЖЕНИЯ, ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ, ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ РАЗЪЕДИНИТЕЛЬ, ТРАНСФОРМАТОР СОБСТВЕННЫХ НУЖД.

Объект Реконструкции – ПС «Екатерининская» 110/6 кВ ПАО «Россети Урал»

Целью бакалаврской работы является реконструкция электрической части ПС «Екатерининская» 110/6 кВ ПАО «Россети Урал» с учетом применения современного высоковольтного оборудования.

В ходе выполнения работы дана характеристика объекта и питающей линии электропередачи. Произведен выбор силовых трансформаторов и трансформаторов собственных нужд в соответствии с электрическими нагрузками. Расчет токов короткого замыкания произведен с целью выбора высоковольтного оборудования электрической подстанции. На основании расчетных рабочих и максимальных токов, а также токов КЗ выбраны трансформаторы тока, трансформаторы напряжения, высоковольтные выключатели и разъединители на высоком и низком напряжении. Для управления выключателями и разъединителями выбрана система оперативных токов подстанции.

Практическая значимость исследований обусловлена тем, что предложенные виды электрооборудования и технические решения схемы электроподстанции могут быть использованы для проектирования и реконструкции подстанций с высшим напряжением 110-220 кВ и низшим напряжением 6-10 кВ.

## THE ABSTRACT

The final qualifying work on the topic “Reconstruction of the 110/6 kV substation Ekaterininskaya PJSC Rosseti Urals” contains 59 pages of text document, 36 used sources, 3 sheets of graphic material.

SUBSTATION, POWER TRANSFORMER, POWER LINE, SHORT CIRCUIT CURRENT, CURRENT TRANSFORMER, VOLTAGE TRANSFORMER, HIGH-VOLTAGE SWITCH, HIGH-VOLTAGE DISCONNECTOR, OWN NEEDS TRANSFORMER.

The object of the study is the substation “Ekaterininskaya” 110/6 kV of PJSC Rosseti Ural.

The subject of the study is the electrical part of the substation.

The goal of the bachelor's work is to design the electrical part of the Ekaterininskaya substation 110/6 kV of PJSC Rosseti Ural, taking into account the use of modern high-voltage equipment.

During the work, the characteristics of the object and the power transmission line were given. A selection of power transformers and auxiliary transformers was made in accordance with the electrical loads. The calculation of short circuit currents was carried out in order to select high-voltage equipment for an electrical substation. Based on the calculated operating and maximum currents, as well as short-circuit currents, current transformers, voltage transformers, high-voltage switches and disconnectors for high and low voltage were selected. To control switches and disconnectors, a system of operational currents of the substation was selected.

The practical significance of the research is due to the fact that the proposed types of electrical equipment and technical solutions for the electrical substation circuit can be used for the design and reconstruction of substations with a higher voltage of 110-220 kV and a lower voltage of 6-10 kV.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	8
1 Теоретическая часть .....	9
1.1 Характеристика подстанции 110/6 кВ «Екатерининская» «ПАО Россети Урала».....	9
1.2 Обоснование реконструкции подстанции .....	11
2 Аналитическая часть .....	14
2.1 Анализ перспективных конструкций основных электроустановок и электрооборудования подстанций на напряжение 110 кВ.....	14
2.1.1 Современные трансформаторы тока 110 кВ .....	14
2.1.2 Современные трансформаторы напряжения 110 кВ .....	18
2.1.3 Современные выключатели 110 кВ .....	21
2.1.4 Современные разъединители 110 кВ.....	25
2.2 Анализ перспективных конструкций ячеек с выключателями на напряжение 6 кВ .....	27
3 Практическая часть .....	30
3.1 Выбор трансформаторов .....	30
3.2 Питающая линия .....	33
3.3 Расчет токов КЗ .....	36
3.4 Выбор оборудования 110 кВ.....	41
3.4.1 Выбор схем распределительных устройств .....	41
3.4.2 Расчет рабочих максимальных токов .....	42
3.4.3 Выбор и проверка электрических аппаратов высокого напряжения .....	43
3.4.4 Выбор контрольно-измерительной аппаратуры .....	44
3.4.5 Выбор и проверка шин высокой стороны .....	47

3.5 Выбор оборудования 6 кВ.....	48
3.5.1 Расчет максимальных рабочих токов, выбор и проверка сборных шин на стороне НН.....	48
3.5.2 Выбор и проверка электрических аппаратов низкого напряжения ..	50
3.5.3 Выбор контрольно-измерительной аппаратуры .....	51
3.6 Выбор ТСН .....	52
3.7 Выбор системы оперативных токов .....	54
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	56
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	57

## ВВЕДЕНИЕ

Электрические подстанции являются незаменимыми звеньями при передаче электрической энергии и трансформации ее до нужного класса напряжения. То есть они осуществляют прием электрической энергии от энергосистемы и её распределение. Нарушение их работы может привести к значительному ущербу из-за нарушения технологических процессов или процессов жизнедеятельности различных объектов или повреждения технологического оборудования. Проектирование и реконструкция понизительных подстанций является главным этапом и именно на этой стадии должны быть предусмотрены мероприятия по повышению надежности. Мероприятия заключаются в обоснованном выборе схем распределительных устройств, оборудования и электрических аппаратов, стойких к токам короткого замыкания.

Объект реконструкции – ПС «Екатерининская» 110/6 кВ ПАО «Россети Урал».

Целью бакалаврской работы является реконструкция электрической части ПС «Екатерининская» 110/6 кВ ПАО «Россети Урал» с учетом применения современного высоковольтного оборудования.

Задачами данной ВКР являются:

- представить характеристику объекта и питающей линии электропередачи;
- произвести выбор трансформаторов в соответствии с электрическими нагрузками;
- рассчитать токи короткого замыкания с целью выбора высоковольтного оборудования электрической подстанции;
- выбрать основное электрооборудование подстанции: трансформаторы тока, трансформаторы напряжения, высоковольтные выключатели и разъединители на высоком и низком напряжении на основании расчетных рабочих и максимальных токов, а также токов КЗ.



## **1 Теоретическая часть**

### **1.1 Характеристика подстанции 110/6 кВ «Екатерининская» ПАО «Россети Урала»**

Подстанция 110/6 кВ «Екатерининская» ПАО «Россети Урал» принадлежит Филиалу «Свердловэнерго» Свердловской области (Карпинский РЭС). Год ввода в эксплуатацию – 1988 г.

Питание подстанции осуществляется от отпайки транзитной ВЛ 110 кВ «Першино-Черемухово». Общая однолинейная схема ПС показана на рисунке 1.1. Схема (рисунок 1.1) включает в себя:

- на вводе в ПС высокочастотный заградитель (ВЧЗ) 110 кВ Першино-Черемухово (ф. А, В, С);

- линейный разъединитель (ЛР) с двумя заземляющими ножами (ЗН), один из которых работает в сторону ВЛ, а другой – в сторону трансформатора подстанции;

- блок с отделителем (ОД 110 кВ Т-1) и короткозамыкателем (КЗ 110 кВ Т-1), между трансформатором Т-1 и данным блоком присоединен разрядник РК 110 кВ Т-1;

- на низкой стороне 6 кВ на вводе присоединен разрядник РК 6 кВ Т-1;

- от секции шин 1С 6 кВ производится питание электропотребителей подстанции (Полигон 1, Полигон 2, Поселок);

- на низкой стороне 6 кВ на отходящих линиях КРУН 6 кВ установлены ячейки (всего 8 ячеек, из которых 2 резервные) с высоковольтными выключателями В 6 кВ и шинными разъединителями ШР 1С 6 кВ; каждый разъединитель имеет по одному заземляющему ножу со стороны шин 1С 6 кВ; другой разъединитель установлен со стороны потребителя после ячейки с выключателем и также имеет один заземляющий нож;

- для измерительных целей и для обеспечения устройств релейной защиты и автоматики предусмотрены трансформаторы тока ТТ 6 кВ в

ячейках на каждом отходящем присоединении;

- для питания оборудования собственных нужд предусмотрен один трансформатор ТСН-1 на 25 кВА, на стороне 6 кВ которого стоят разъединитель Р 6 кВ ТСН-1 и высоковольтный предохранитель П 6 кВ ТСН-1,

- для измерительных целей и для обеспечения устройств релейной защиты и автоматики предусмотрен трансформатор напряжения ТН-1 6 кВ в ячейках на одном отходящем присоединении.

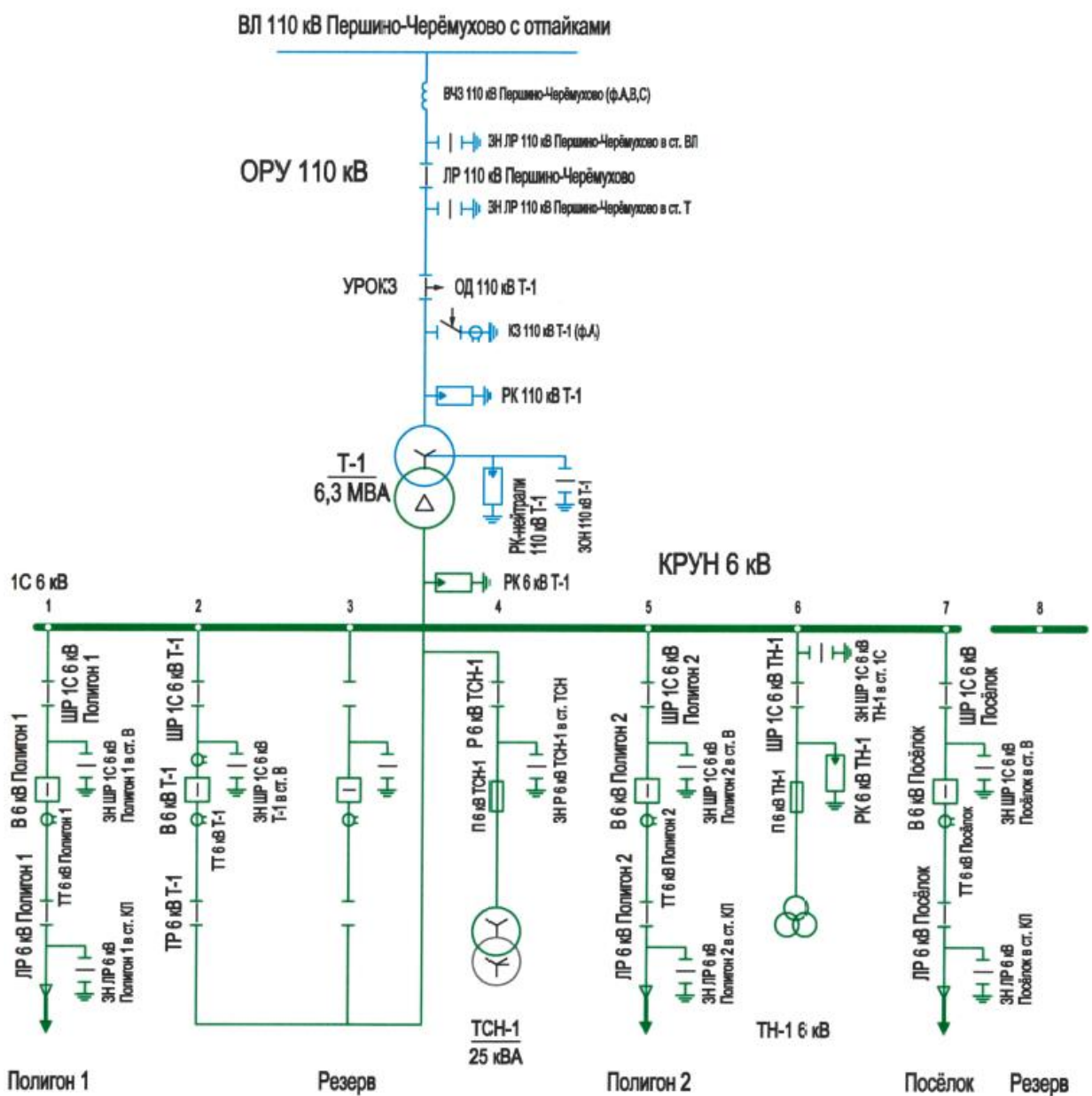


Рисунок 1.1 – Общая однолинейная схема ПС

Общий вид существующего трансформатора Т-1 подстанции типа ТМН-6300/110 представлен на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Общий вид существующего трансформатора Т-1 подстанции типа ТМН-6300/110

## **1.2 Обоснование реконструкции подстанции**

За время эксплуатации подстанции ее реконструкция производилась в 2003 году. Нагрузка трансформатора в пиковой части до подключения новых потребителей по замерам на конец 2023 г. составила 3,61 МВт. В настоящий момент оборудование, описанное в п.1.1, достаточно сильно износилось, стало менее надежным, т.к. участились случаи его отказа. Кроме того, единственный трансформатор в последнее время стал загружен фактически почти на 100% из-за возросшей электрической нагрузки (на 2,78 МВт) в данном районе вследствие перевода питания на эту подстанцию других населенных пунктов (Черемухово, Глухарный, Денежкино и Старая Сама –

ниже по карте), кроме уже подключенных поселков Екатерининка и Надымовка и полигонов (рисунок 1.3). Также, в связи с нуждами возникла необходимость подключения еще двух полигонов с мусоросортировочными комплексами и конвейерными линиями в их составе.

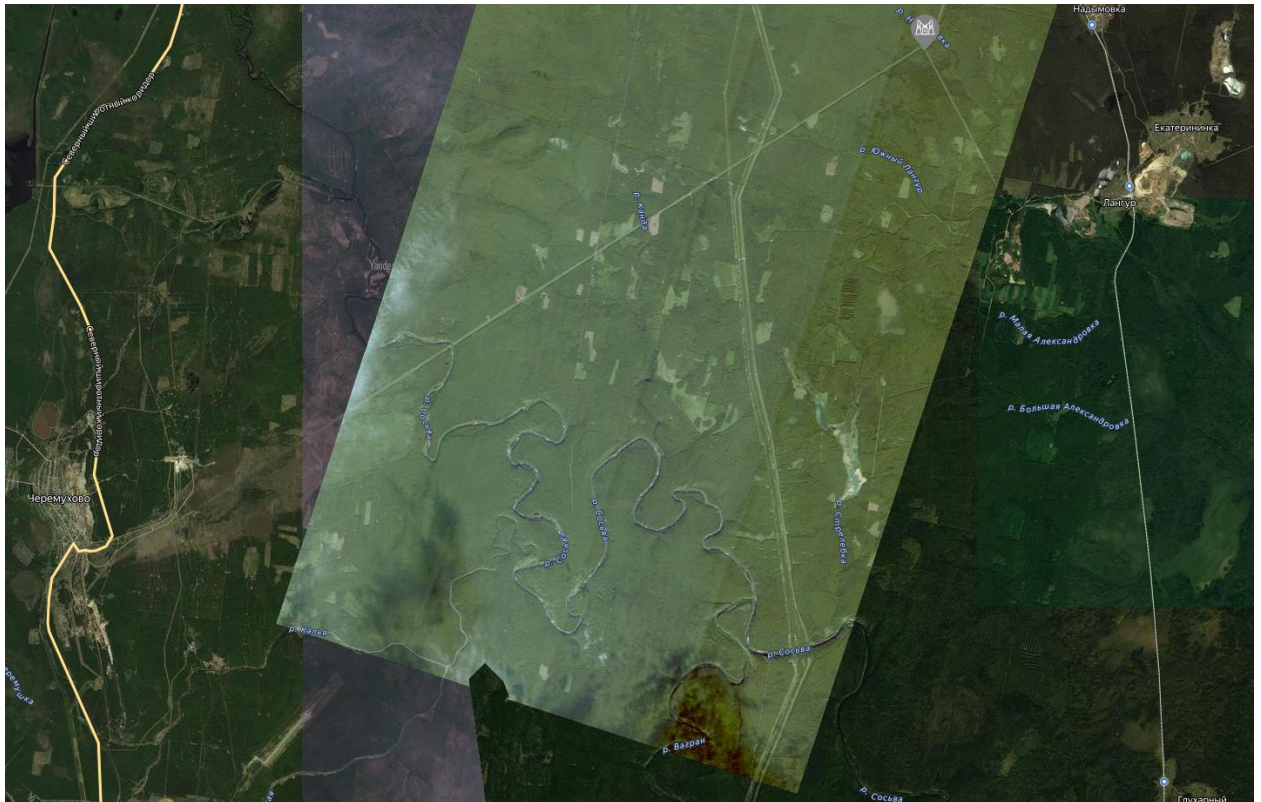


Рисунок 1.3 – Месторасположение ПС «Екатерининская», населенных пунктов и полигонов на карте местности

Выключатели на напряжение 110 кВ типа МКП-110м-630-20У1, трансформаторы тока ТФЗМ110Б-І ХЛ1 и напряжения НКФ-110-83, разъединители типа РНДЗ-110-630У1 имеют устаревшую конструкцию и множество недостатков по сравнению с современными типами указанного электрооборудования.

В связи с вышеперечисленными причинами возникла необходимость в реконструкции подстанции и расширении ее мощности практически в два раза, что будет обосновано ниже при расчете нагрузки для уточнения мощности нагрузки подстанции и необходимости принятия решения по

строительству второй секции шин 6 кВ (2С КРУН-6 кВ) и установке второго силового трансформатора.

## **2 Аналитическая часть**

### **2.1 Анализ перспективных конструкций основных электроустановок и электрооборудования подстанций на напряжение 110 кВ**

#### **2.1.1 Современные трансформаторы тока 110 кВ**

В трансформаторах тока ТРГ-УЭТМ 110 кВ (рисунок 2.1) для заполнения используется смесь - элегаз и тетрафторметан-14 или элегаз и азот [29, 33].



Рисунок 2.1 – Трансформатор тока ТРГ УЭТМ напряжением 110 кВ

Преимущества ТРГ УЭТМ показаны на рисунке 2.2 [33].

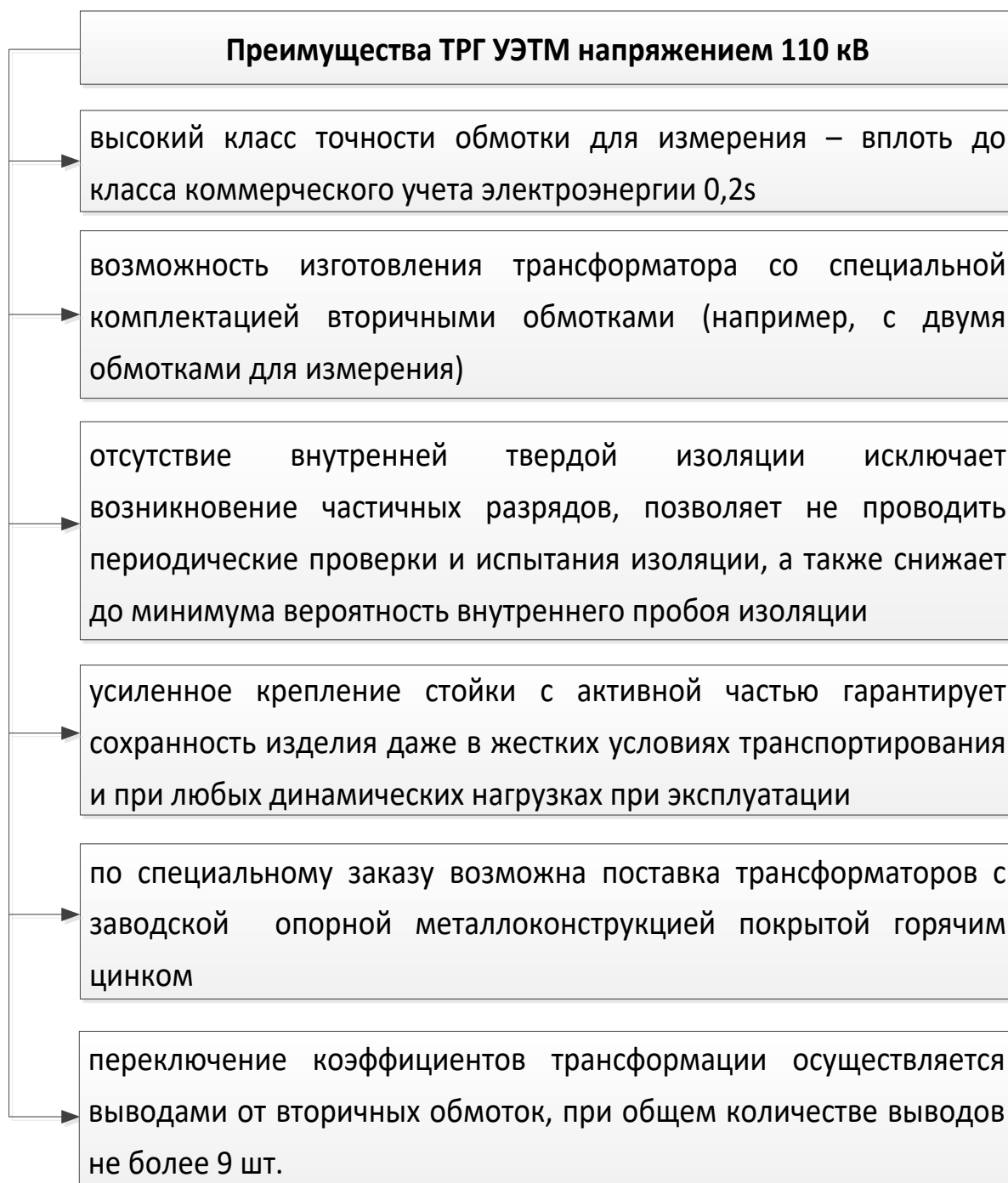


Рисунок 2.2 – Преимущества ТРГ УЭТМ



ТОГФ-110 (УХЛ1) – трансформаторы тока элегазовые с фарфоровой изоляцией (рисунок 2.3) [27, 29].



Рисунок 2.3 – Трансформатор тока ТОГФ-110

Особенности конструкции ТОГФ-110 представлены на рисунке 2.4 [34]. Он надежен в эксплуатации, безопасен, если даже вблизи имеются источники зажигания, т.к. содержит негорючий газ – субстанцию, облегчающую гашение электрической дуги.



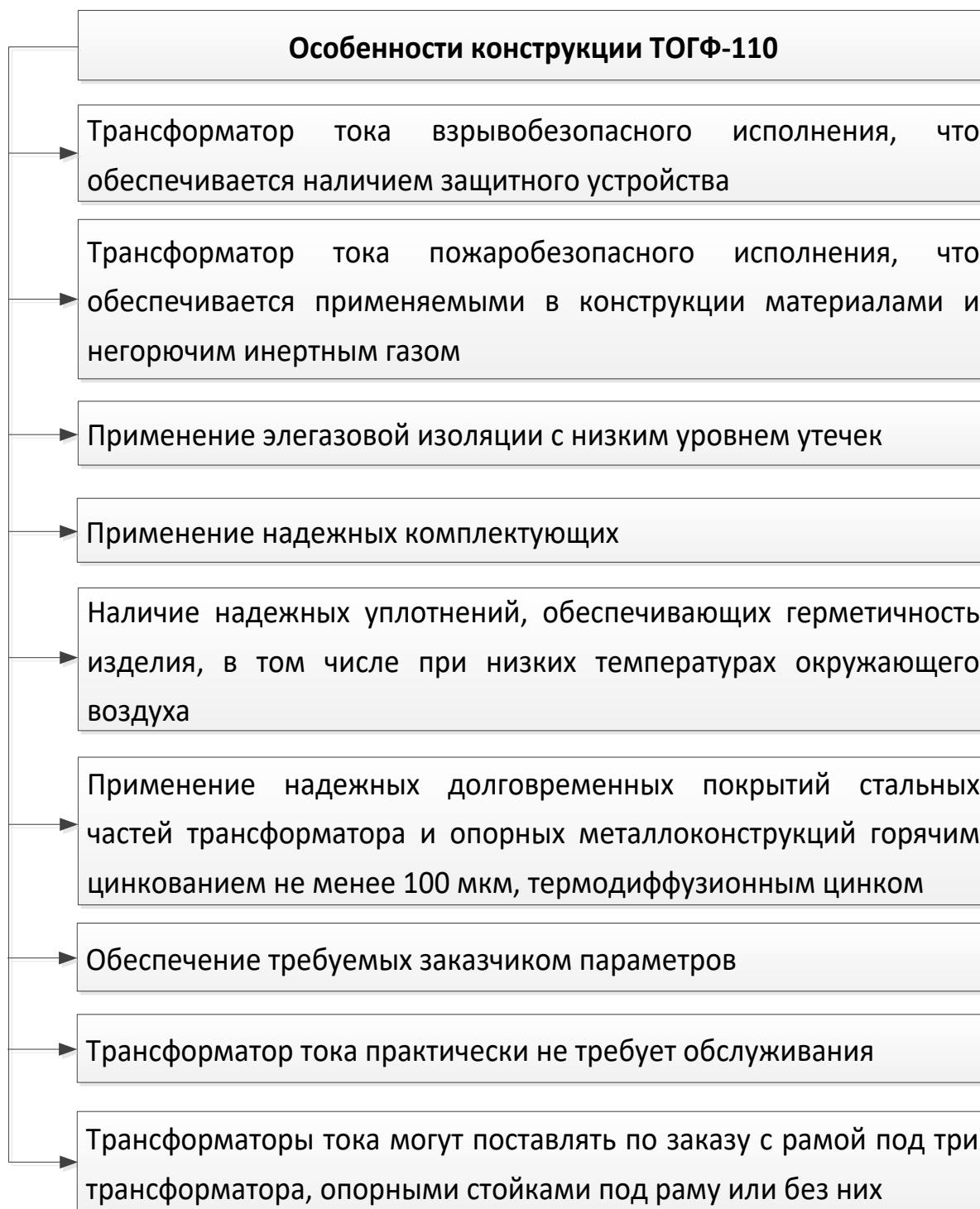


Рисунок 2.4 – Конструкция ТОГФ

## 2.1.2 Современные трансформаторы напряжения 110 кВ

Особенности конструкции ЗНГ-УЭТМ-110 (рисунок 2.5) показаны на рисунке 2.6 [30].

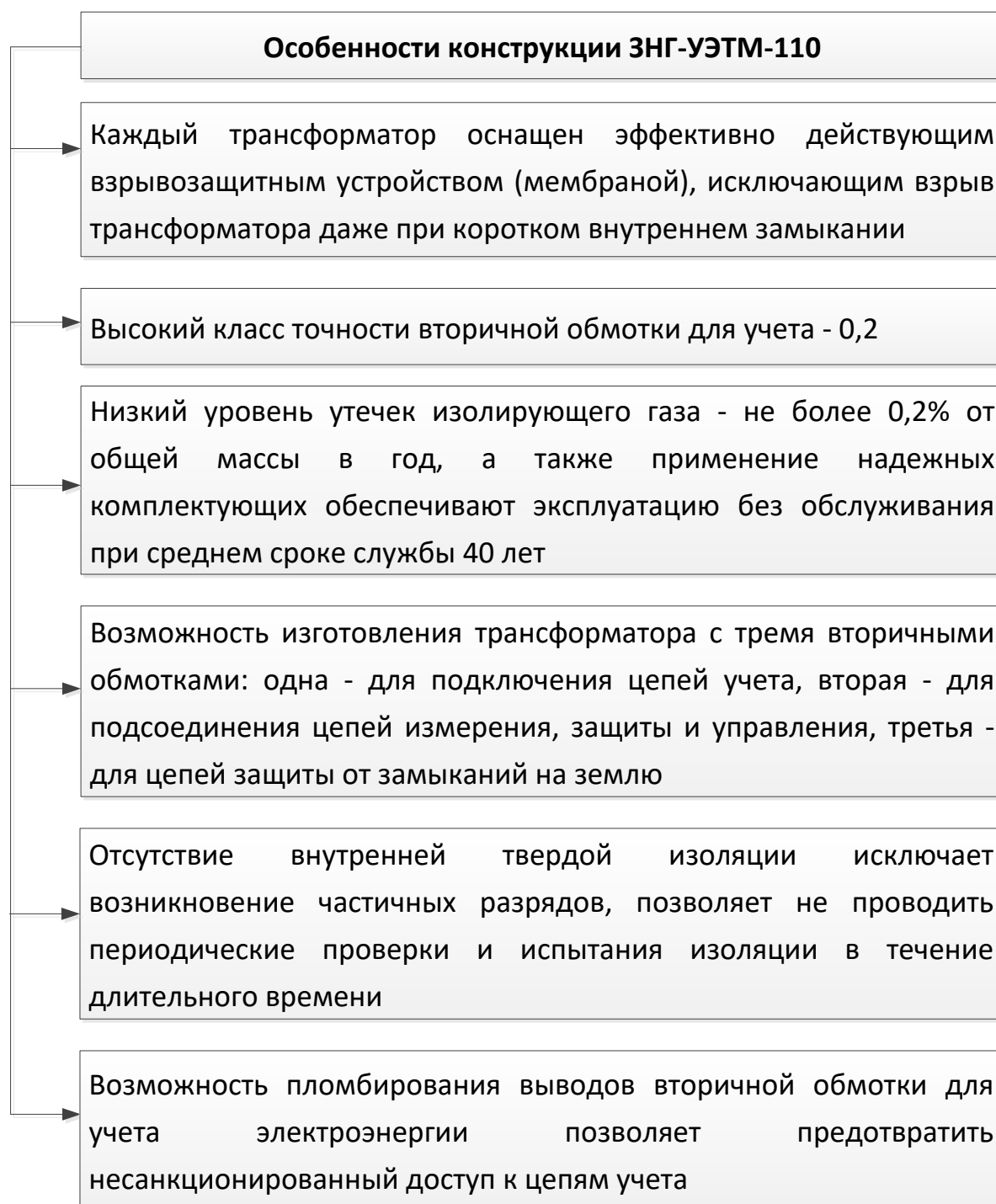


Рисунок 2.5 – Конструкции ЗНГ-УЭТМ



Рисунок 2.6 – Трансформатор напряжения ЗНГ-УЭТМ

Трансформаторы напряжения элегазовые ЗНОГ-110(У1, УХЛ1) (рисунок 2.7) также надежны в эксплуатации, безопасны, если даже вблизи имеются источники зажигания, т.к. содержит негорючий газ – субстанцию, обеспечивающую надежную изоляцию в случае возникновения перенапряжений [26]. Особенности ТН ЗНОГ-110 показаны на рисунке 2.8.



Рисунок 2.7 – Трансформатор напряжения ЗНОГ

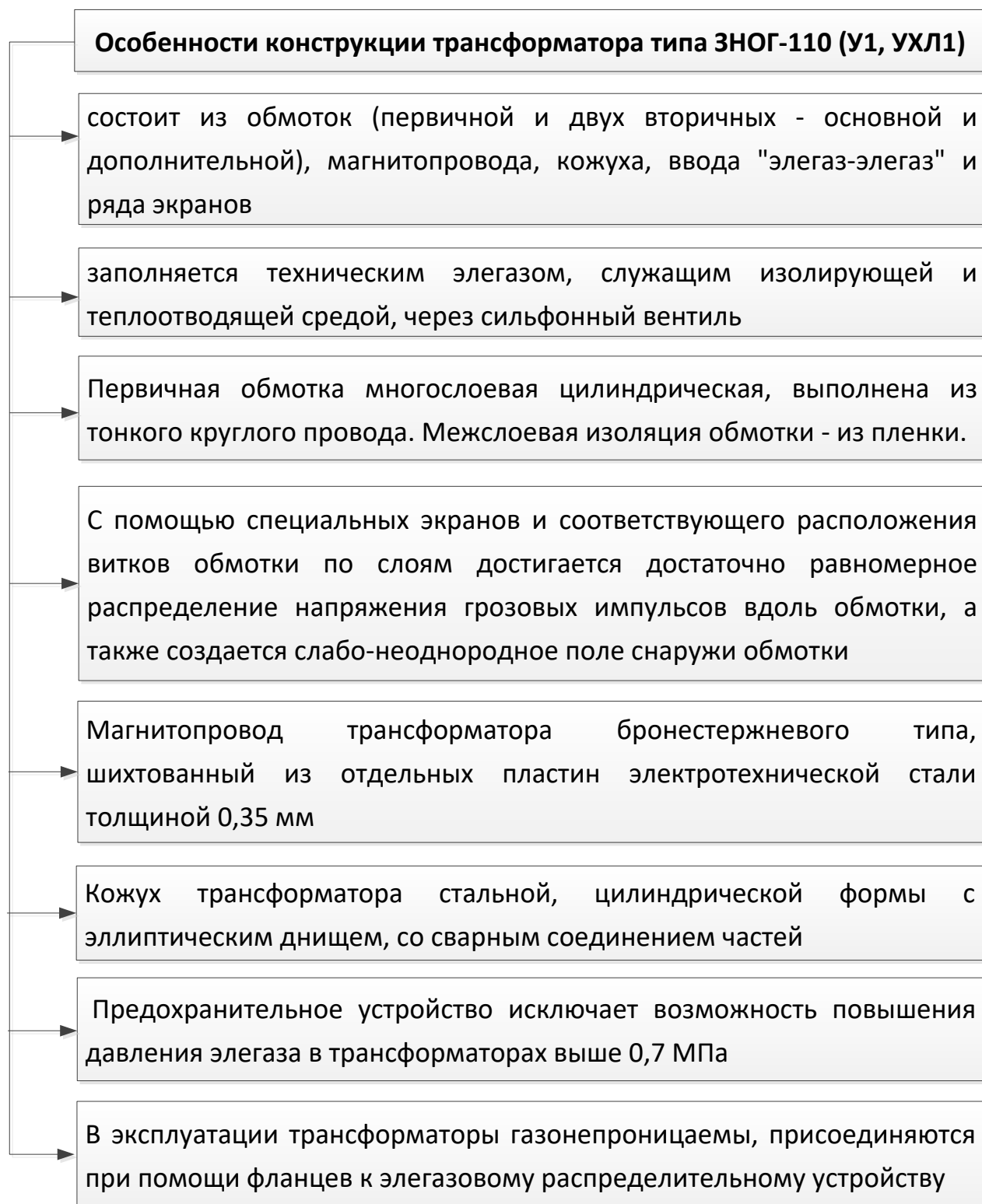


Рисунок 2.8 – Описание конструкции ТН ЗНОГ

### 2.1.3 Современные выключатели 110 кВ

Выключатель ВГТ-110 (У1, УХЛ1) надежен в эксплуатации, безопасен, если даже вблизи имеются источники зажигания, т.к. содержит негорючий газ – субстанцию, облегчающую гашение электрической дуги [1].

Особенности их конструкции показаны на рисунке 2.9.

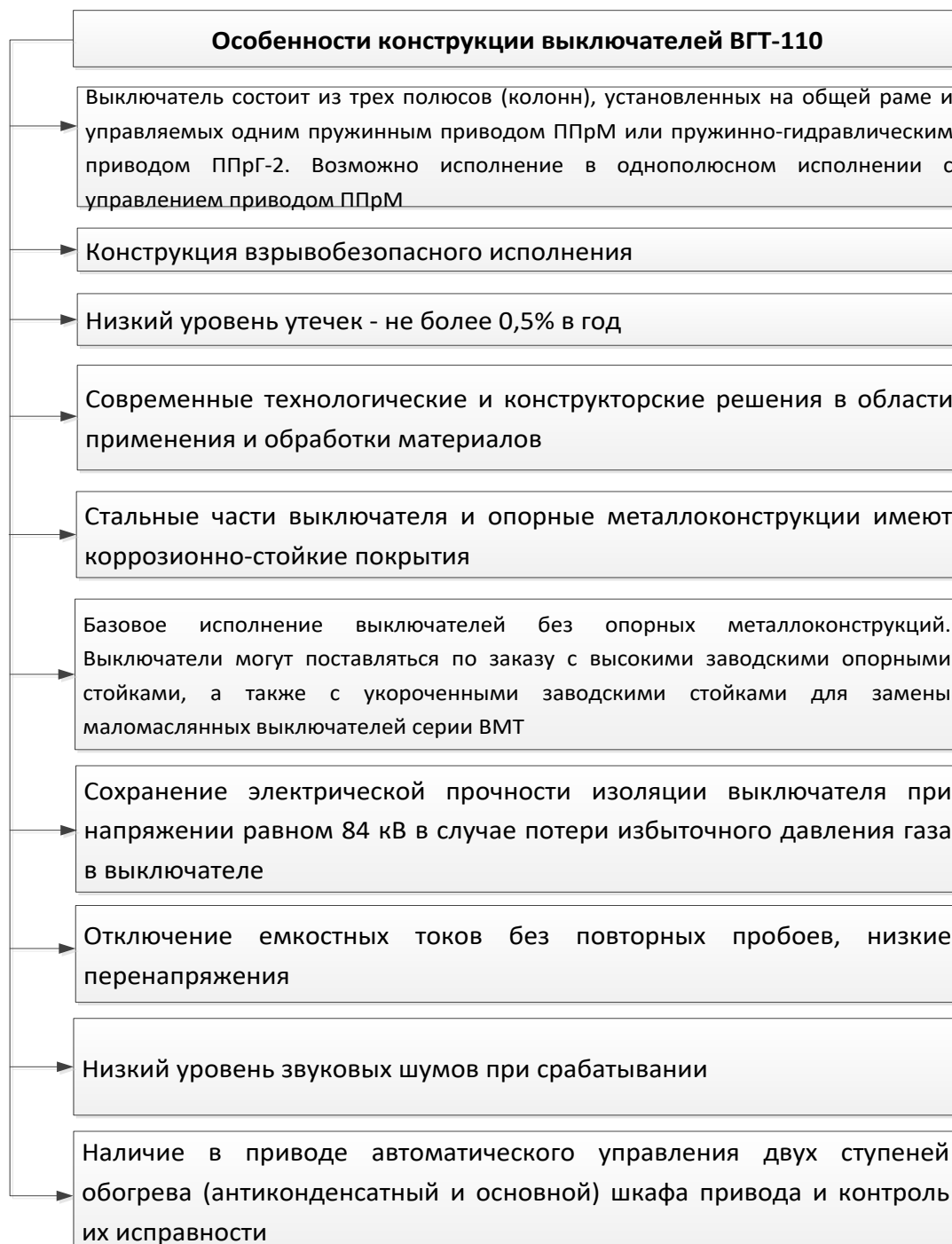


Рисунок 2.9 – Особенности конструкции выключателей ВГТ-110

Преимущества ВГТ-110 показаны на рисунке 2.10.

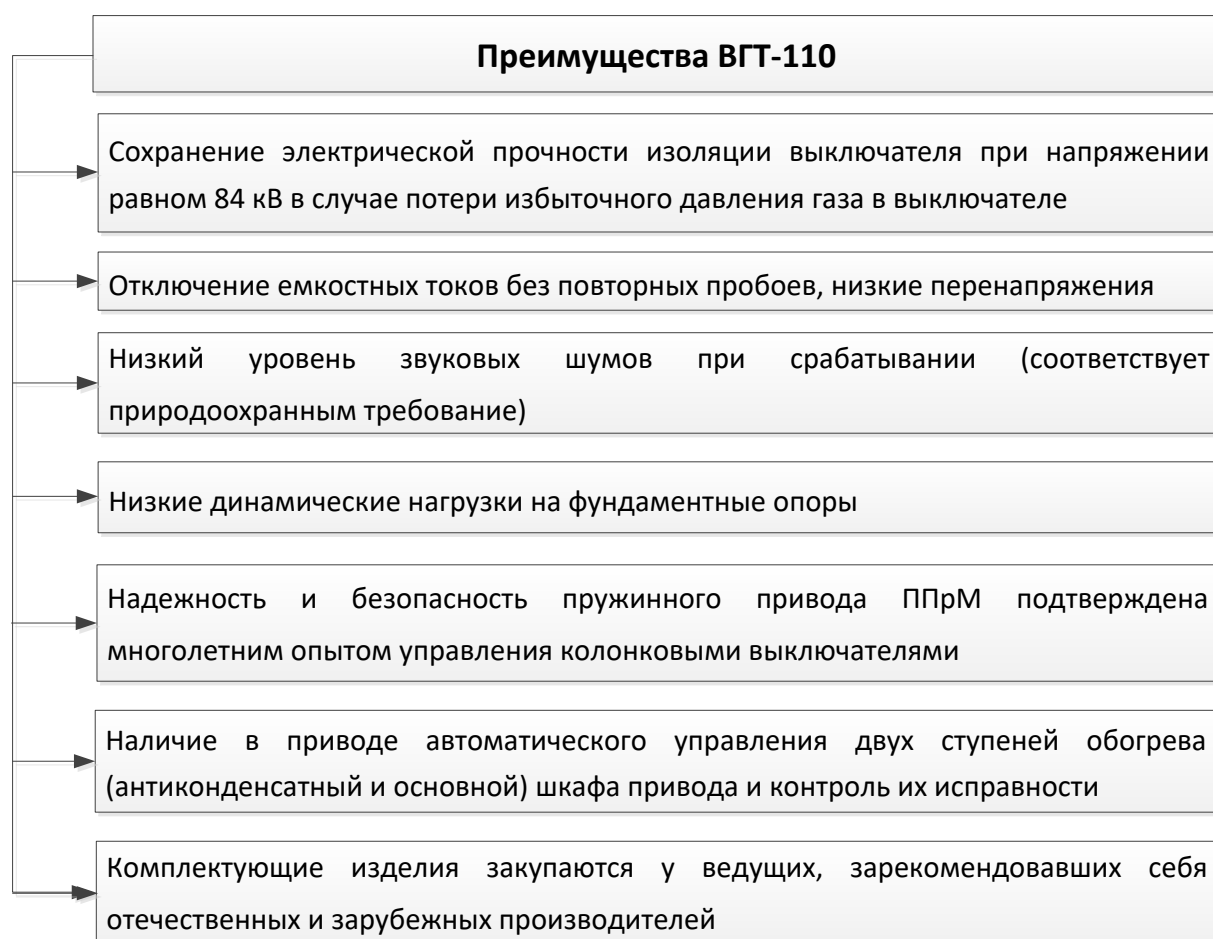


Рисунок 2.10 – Преимущества ВГТ-110

Технические характеристики выключателя ВГТ-110 представлены в [1, 4], а общий вид выключателя ВГТ-110 – на рисунке 2.11.



Рисунок 2.10 – Общий вид выключателя ВГТ-110

Аналогичную конструкцию и характеристики имеет другой подобный современный, но вакуумный выключатель на напряжение 110 кВ с одним разрывом на фазу – типа ВРС-110 [3], общий вид которого показан на рисунке 2.11. Его основные преимущества отражены на рисунке 2.12. В сравнении с элегазовыми выключателями существующих колонковых конструкций на напряжение 110 кВ преимущества заключаются в его стабильности, удобстве сборки, высоком коммутационном ресурсе, экологической безопасности и большей надежности, а в сравнении с масляными выключателями на напряжение 110 кВ можно добавить минимальную стоимость обслуживания, пожаробезопасность и взрывобезопасность.



Рисунок 2.11 – Общий вид выключателя ВРС-110

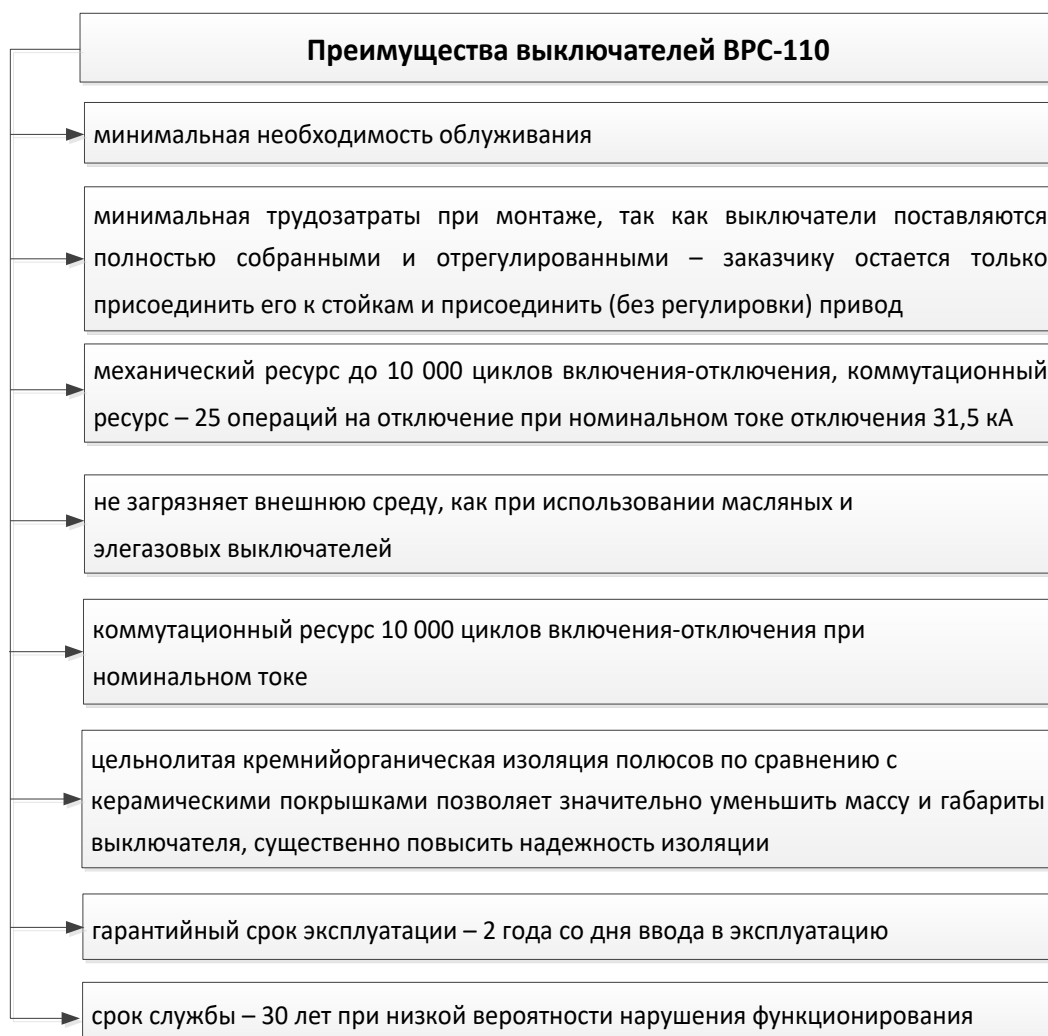


Рисунок 2.12 – Преимущества ВРС-110



## 2.1.4 Современные разъединители 110 кВ

Разъединители типа РГП-110 (рисунок 2.13), РГНП-110 в дополнение имеет заземляющие ножи улучшенной конструкции.

Основные технические данные разъединителей различных типов, в том числе и РГП-110, представлены в источниках [8-14].

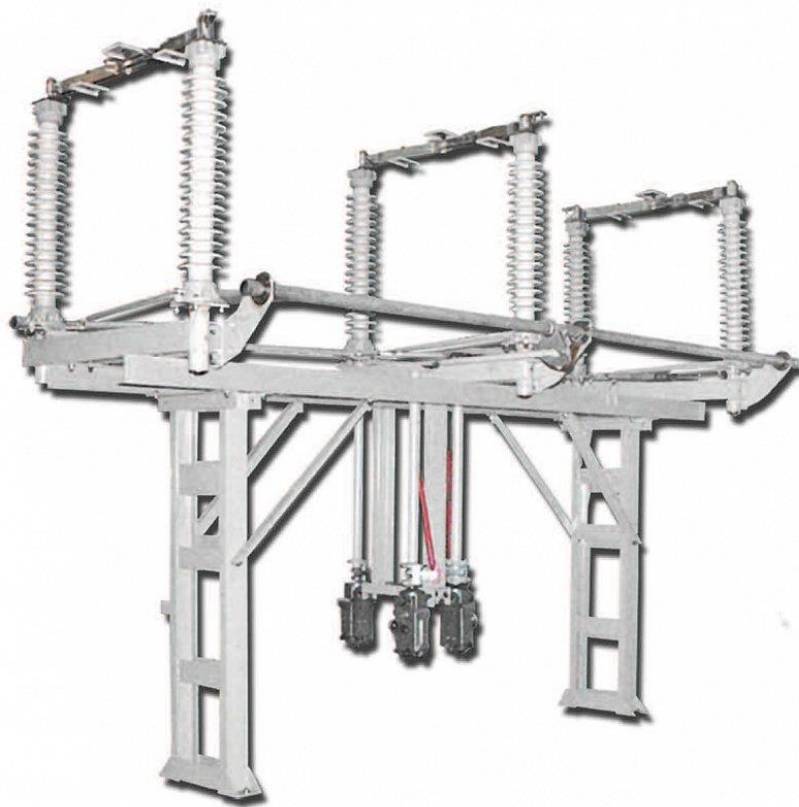


Рисунок 2.13 – Общий вид разъединителя РГП-110

Особенности конструкции разъединителей типов РГП-110, РГП-СЭЩ-110, РГ-110 представлены в виде схемы на рисунке 2.14 [8-14].

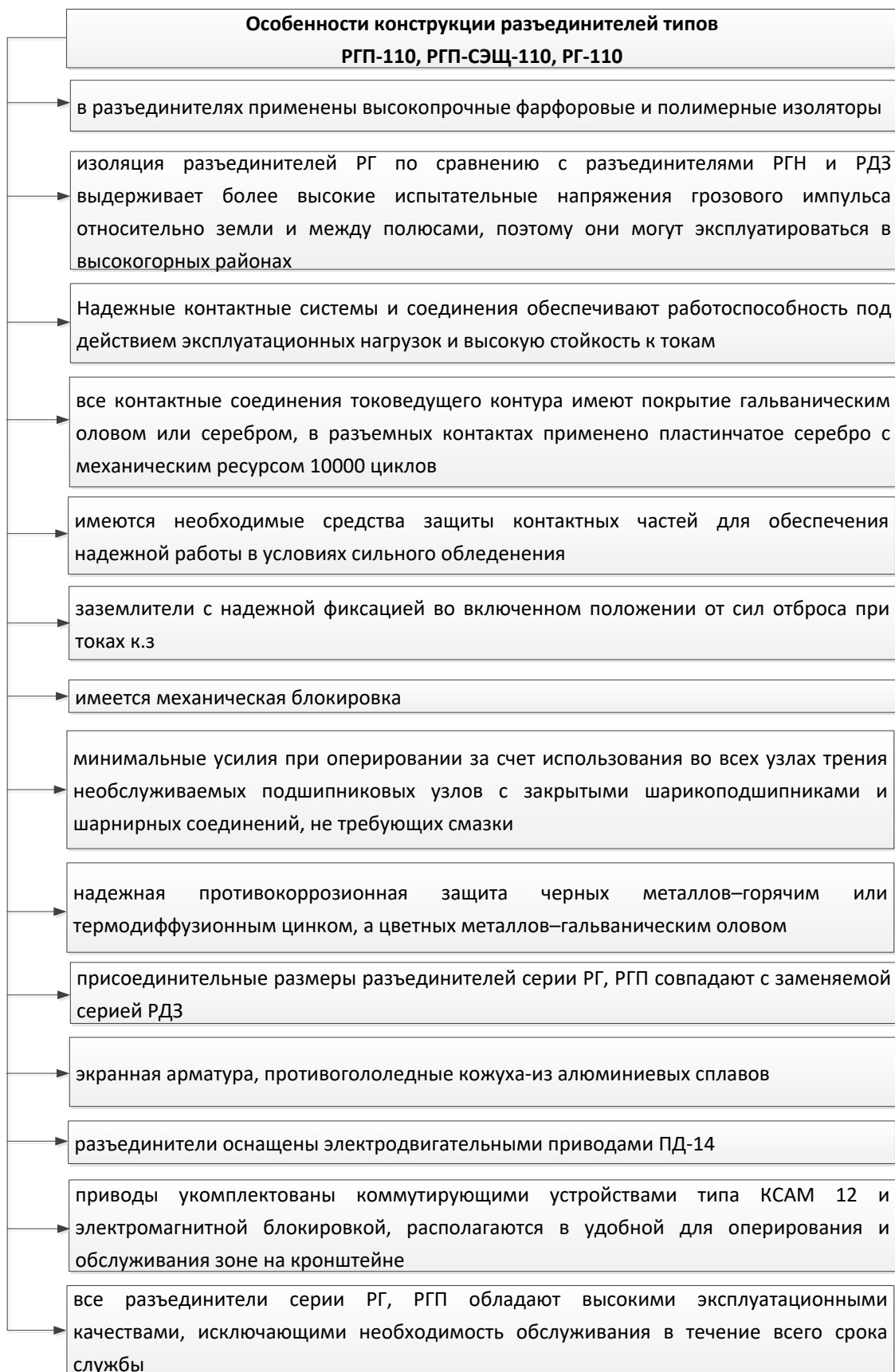


Рисунок 2.14 – Особенности конструкции разъединителей типов РГП-110, РГ

Разъединитель РН СЭЩ 110 кВ, рисунок 2.15 – аналог рассмотренных выше [10, 12, 13].



Рисунок 2.15 – Разъединитель РН СЭЩ

## **2.2 Анализ перспективных конструкций ячеек с выключателями на напряжение 6 кВ**

Перспективными типами выключателей, которые составляют основу высоковольтных ячеек 6-10 кВ отходящих фидеров от сборных шин того же напряжения, являются вакуумные выключатели серии ВВ/TEL производства Таврида-Электрик. Они имеют перспективную конструкцию и множество достоинств. Выключатели предназначены для модернизации камер сборных одностороннего обслуживания (КСО), комплектных распределительных устройств наружного исполнения (КРУН) и шкафов КРУ в сетях с номинальным напряжением 6(10) кВ [2].

В качестве вводных и секционных ячеек, а также для отходящих линий перспективны ячейки типа ISM15-Shell-2 (250 Н) серии ВВ/TEL (рисунок 2.16).

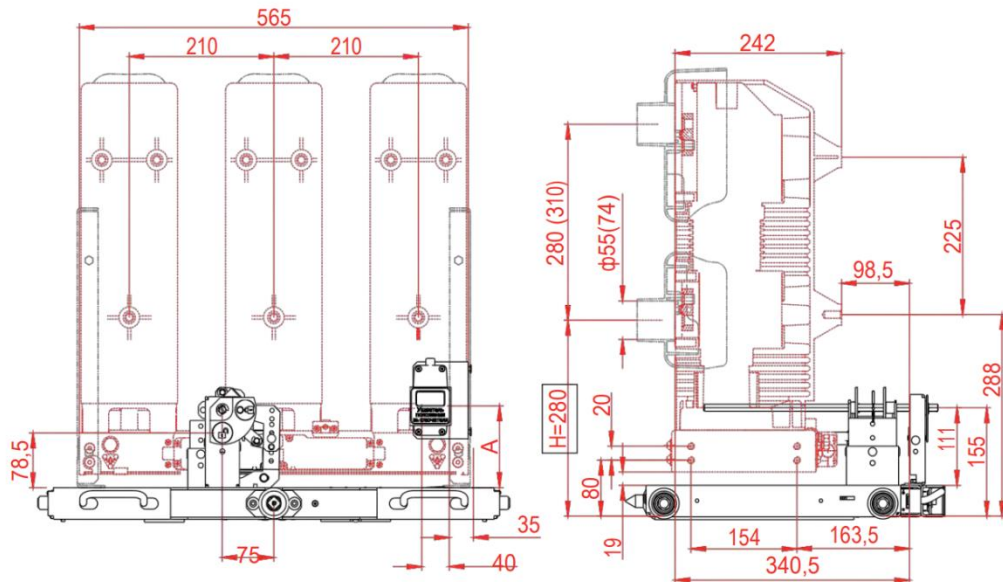


Рисунок 2.16 – Общий вид ячейки

В качестве ячейки управления может быть использован электронный модуль управления CM\_1501\_01(4) (рисунок 2.17) [2]. Особенности алгоритма электроблокировки представлены на рисунке 2.18.

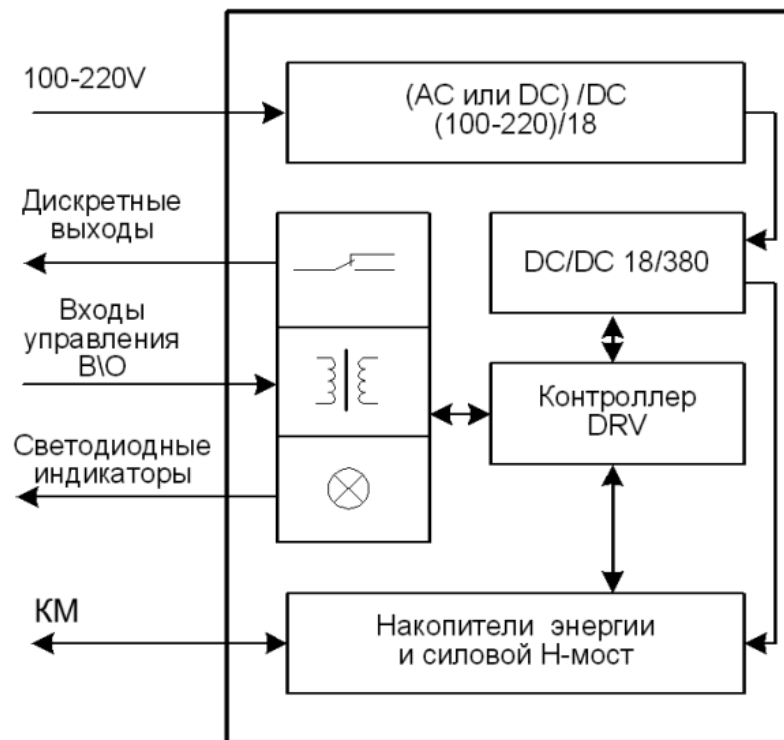


Рисунок 2.17 – Схема электронного модуля управления CM\_1501\_01(4)

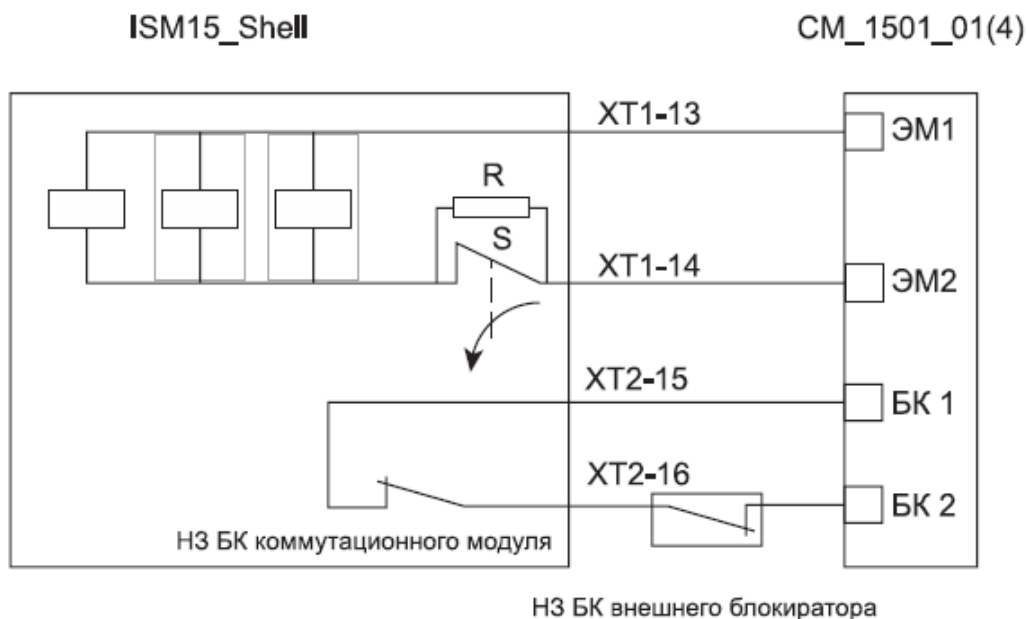


Рисунок 2.18 – Электрическая блокировка

Электронный модуль имеет широкие возможности управления состояниями ячейки выключателя, которые показаны на рисунке 2.19.

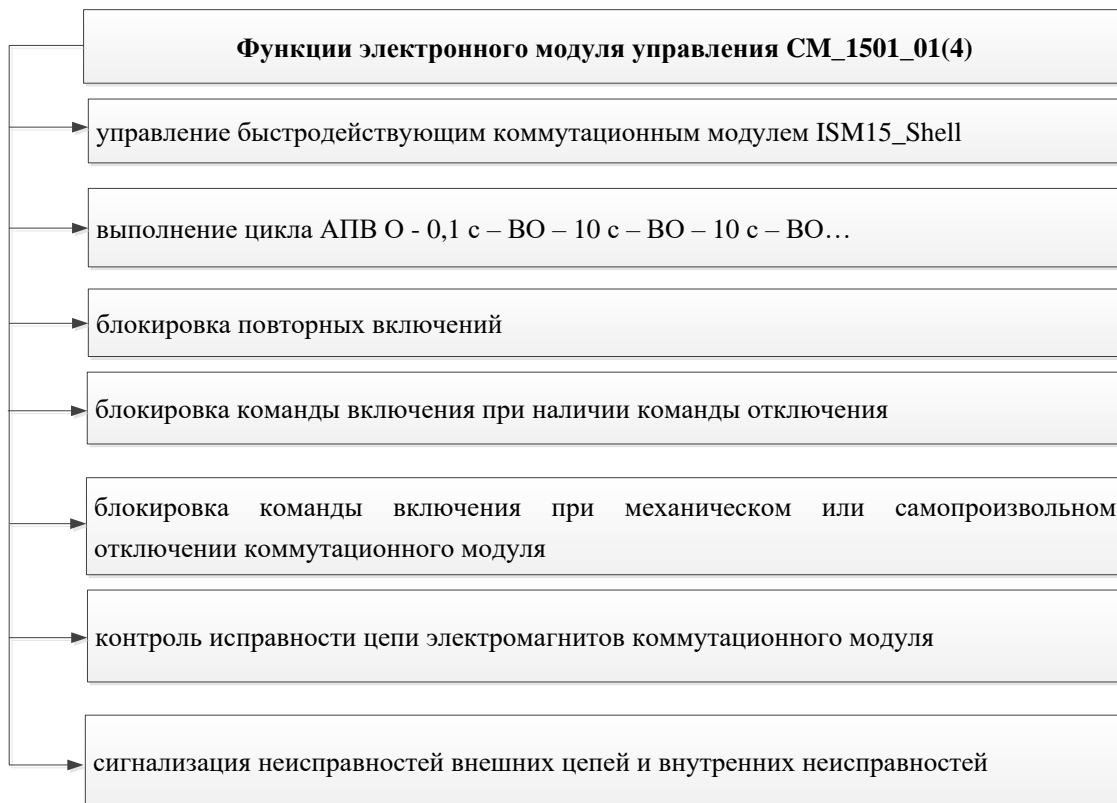


Рисунок 2.19 – Возможности управления состояниями ячейки выключателя

### 3 Практическая часть

#### 3.1 Выбор трансформаторов

Питание ПС организовано по одной двухцепной воздушной ЛЭП. Нужна установка двух трансформаторов, т.к. присутствуют потребители II категории по надежности электроснабжения.

Полная мощность нагрузки складывается из расчетных мощностей электрических мощностей потребителей (МВт):

$$S_{\max} = \frac{P_{\text{нагр1}} + P_{\text{нагр2}}}{\cos \phi_{\text{нагр}}}, \quad (3.1)$$
$$S_{\max} = \frac{3,61 + 2,78}{0,8} = \frac{6,39}{0,8} = 8 \text{ МВА},$$

где  $\cos \phi_{\text{нагр}}$  - коэффициент мощности нагрузки;

$P_{\text{нагр1}}$ ,  $P_{\text{нагр2}}$  – соответственно существующая 3,61 МВА и подключаемая 2,78 МВА нагрузка подстанции (см. п.1.2).

Перед тем, как выбрать трансформаторы, нужно решить вопрос о компенсации реактивной мощности.

Определим максимальную полную мощность после компенсации:

$$S'_{\max} = \sqrt{P_{\max}^2 + (Q_{\max} - Q_{\text{ку}})^2}, \quad (3.2)$$

где  $P_{\max} = 6,39$  МВт – максимальная активная мощность подстанции,  
максимальная реактивная мощность подстанции,

$$Q_{\max} = \sqrt{S_{\max}^2 - P_{\max}^2} = \sqrt{8^2 - 6,39^2} = 4,81 \text{ МВар}, \quad (3.3)$$

Реактивная мощность от системы,

$$Q_{\text{эс}} = P_{\text{max}} \cdot \text{tg } \varphi_{\sigma} = 6,39 \cdot 0,5 = 3,2 \text{ Мвар}, \quad (3.4)$$

где  $\text{tg } \varphi_{\sigma}$  – для электросистемы,  $\text{tg } \varphi_{\sigma} = 0,5$  [36].

Определим мощность компенсирующих устройств:

$$Q_{\text{ку}} = Q_{\text{max}} - Q_{\text{эс}} = 4,81 - 3,2 = 1,61 \text{ МВар}, \quad (3.5)$$

С целью компенсации реактивной мощности, для повышения  $\cos\varphi$  установим батареи статических конденсаторов. Выбираем 2 установки УКРЛ56-6,3-900-150 У3 [36] номинальной мощностью 900 кВар (0,9 МВар) для установки по одной на каждую секцию 6 кВ ПС.

Таким образом, т.к. секции 2-е, общая фактическая мощность КУ:

$$Q_{\text{ку}} = 0,9 \cdot 2 = 1,8 \text{ МВар},$$

$$\begin{aligned} S'_{\text{max}} &= \sqrt{P_{\text{max}}^2 + (Q_{\text{max}} - Q_{\text{ку}})^2} = \\ &= \sqrt{6,39^2 + (4,81 - 1,8)^2} = 7,06 \text{ МВА}, \end{aligned} \quad (3.6)$$

Расчетная мощность трансформатора:

$$S_{\text{ном}} \geq S_{\text{расч.т}} = \frac{S'_{\text{нагр}}}{K_{\text{п}}}, \quad (3.7)$$

где  $K_{\text{п}} = 1,4$  – коэффициент допустимой перегрузки трансформатора для двухтрансформаторной подстанции в предположении, что трансформаторы работают с коэффициентами загрузки не более 0,7 каждый;

$S'_{\text{нагр}}$  – максимальная полная мощность после компенсации.

$$S_{\text{ном}} \geq \frac{7,06}{2 * 0,7} = 5,04 \text{ МВА}$$

По таблицам справочника [19] выбираем 2 ближайших больших по мощности трансформатора типа ТМН-6300/110 для ПС. Параметры выбранного силового трансформатора представлены в таблице 3.1. Схема соединения  $Y_n/D-11$ . РПН в нейтрали стороне ВН  $+9 \times 1,78\%$ , со встроенными в ввод ВН трансформаторами тока с номинальными токами 100/5 А, (по 2 в каждой фазе; сердечник 1 - [класс/нагрузка/кратность] 0,5/20ВА/5; сердечник 2 - [класс/нагрузка/кратность] 5Р/30ВА/20) и трансформаторами тока встроенными в нейтраль Кт.т=150/5, кл.точности 0,5/5Р.

Таблица 3.1 – Параметры силового трансформатора

Тип	$S_{\text{ном}}$ , МВА	$U_{\text{ном}}$ обмоток, кВ		$u_k$ , %	$\Delta P_k$ , кВт	$\Delta P_x$ , кВт	$I_x$ , %
		ВН	НН				
ТМН-6300 / 110	6,3	115	6,6	10,5	44	11,5	0,8

Общий вид трансформатора типа ТМН-6300/110 представлен на рисунке 1.2.

Таким образом, выбранные силовые трансформаторы типа ТМН-6300/110 в количестве 2-х штук, устанавливаемые на ПС, обеспечат питание заданной величины нагрузки потребителей.



### 3.2 Питающая линия

Линия, питающая через отпайки ПС «Екатерининская» напряжением 110/6 кВ имеет маркировку проводов 3хАС 120/19. Т.к. транзитная линия двухцепная, то имеется возможность подключения к ней двух цепей ответвлений, которые будут питать два трансформатора рассматриваемой ПС.

Полная мощность одной цепи ВЛ:

$$S_{\text{вл}} = \frac{1}{2} \cdot S_{\text{max}} = \frac{1}{2} \cdot 7,06 = 3,53 \text{ МВА.} \quad (3.2)$$

где  $S_{\text{max}}$  – максимальная полная мощность подстанции (см. п.3).

Ток линии:

$$I_5 = \frac{S_{\text{вл}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}}, \quad (3.1)$$
$$I_5 = \frac{3,53 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3} = 18,53 \text{ А.}$$

Расчетный ток определяется через эмпирические коэффициенты:

$$I_p = I_5 \cdot a_i \cdot a_t. \quad (3.3)$$

Значение  $a_i = 1,05$ . Значение  $a_t = 1,2$  при коэффициенте  $K_m = 0,8$  [36].

$$I_p = 18,53 \cdot 1,05 \cdot 1,2 = 23,35 \text{ А.}$$

Сечение ВЛ через нормированную плотность тока [36]:

$$F = \frac{I_p}{j_H} = \frac{23,35}{0,8} = 29,2 \text{ мм}^2. \quad (3.4)$$

С учетом перспективы роста нагрузок принимаем сечение проводников линии отвлечения к ПС, равное  $F = 70 \text{ мм}^2$  (по условиям коронирования разрядов по поверхности проводов),  $I_{\text{доп}} = 380 \text{ А}$ .

Проверка провода АС-70/11 по нагреву в послеаварийном режиме в случае обрыва одной питающей цепи:

$$I_{\text{доп}} = 23,35 * 2 = 46,7 \text{ А} < I_{\text{доп}} = 265 \text{ А}, \text{ условие выполняется.}$$

Подстанция будет иметь 2 стандартных блока приёма ВЛ. Блок приёма ВЛ наружной установки климатического исполнения УХЛ на напряжение 110 кВ предназначен для установки высокочастотных заградителей на вводе ВЛ на ПС.

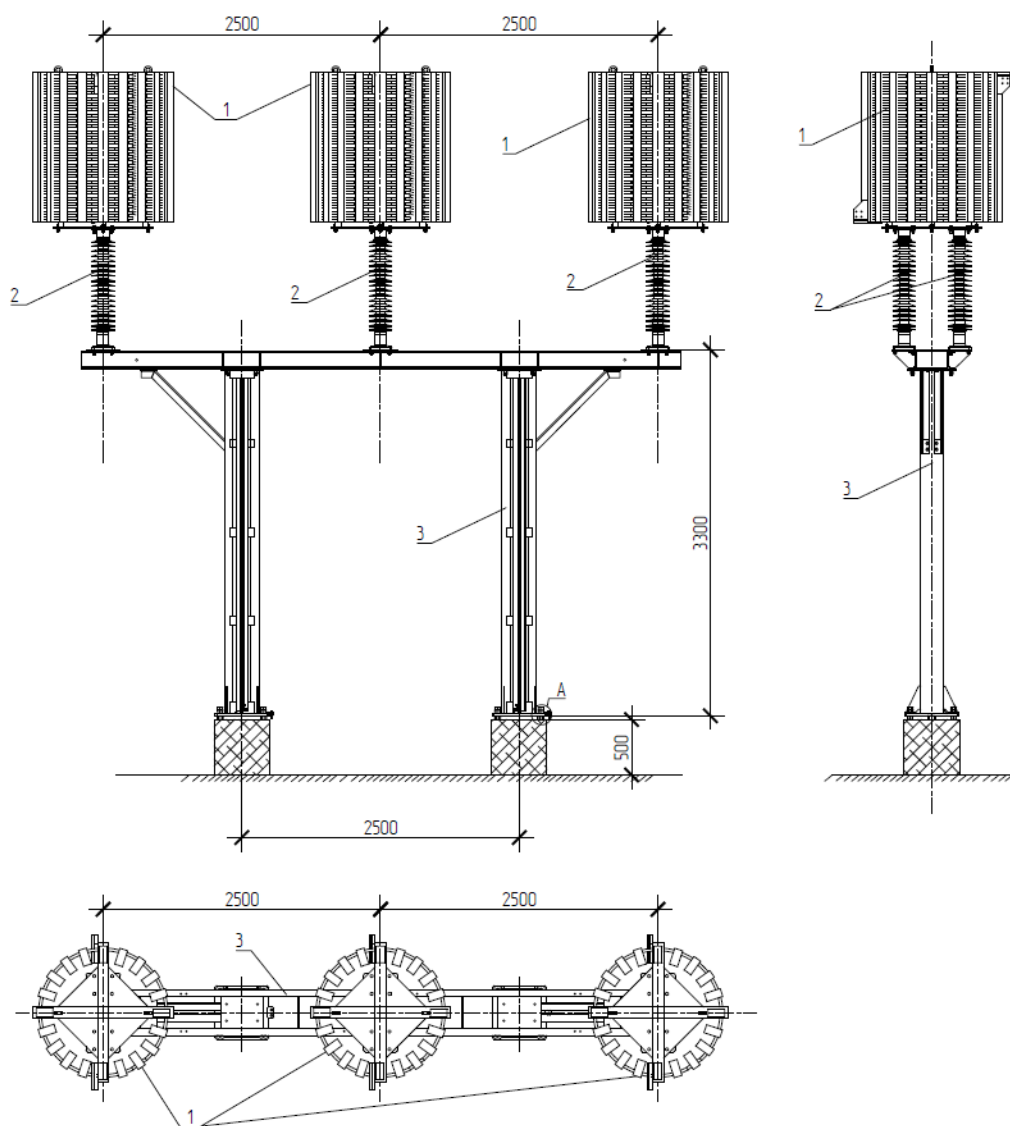
В комплект одного блока входит установочная металлическая конструкция для установки трёх ВЧ заградителей, комплект из трёх ВЧ заградителей, опорные изоляторы

для установки оборудования на несущей конструкции, метизы для установки оборудования на несущей конструкции и установки самого блока.

Параметры ВЧ заградителя ВЗ-630-0,5 УХЛ1 (160-500 кГц):

- тип - ВЗ-630-0,5 УХЛ1;
- номинальное напряжение ВЛ – 110 кВ;
- номинальный длительный ток (действующее значение) – 630 А;
- номинальный кратковременный ток (действующее значение) – 16 кА;
- ударный ток – 41 кА;
- номинальная индуктивность реактора – 0,5 мГн;
- диапазон частот заграждения – 160-500 кГц;
- характеристическое сопротивление ВЛ/ активная составляющая полного сопротивления, не менее – 450/640 Ом;
- схема установки – фаза-земля;
- тип провода АС-70/11 (через аппаратный зажим А2А).

Общий вид заградителя ВЗ-630-0,5 УХЛ1 представлен на рисунке 3.1.



1 – Высокочастотный заградитель; 2 – Опорный изолятор;  
3 - Опорная металлоконструкция

Рисунок 3.1 – Общий вид заградителя ВЗ-630-0,5 УХЛ1

### 3.3 Расчет токов КЗ

На рисунке 3.2 показаны схемы, с помощью которых возможно определение сверхпереходных аварийных токов к.з. и их ударных токов, а также интегралов Джоуля (тепловых импульсов воздействия токов к.з.).

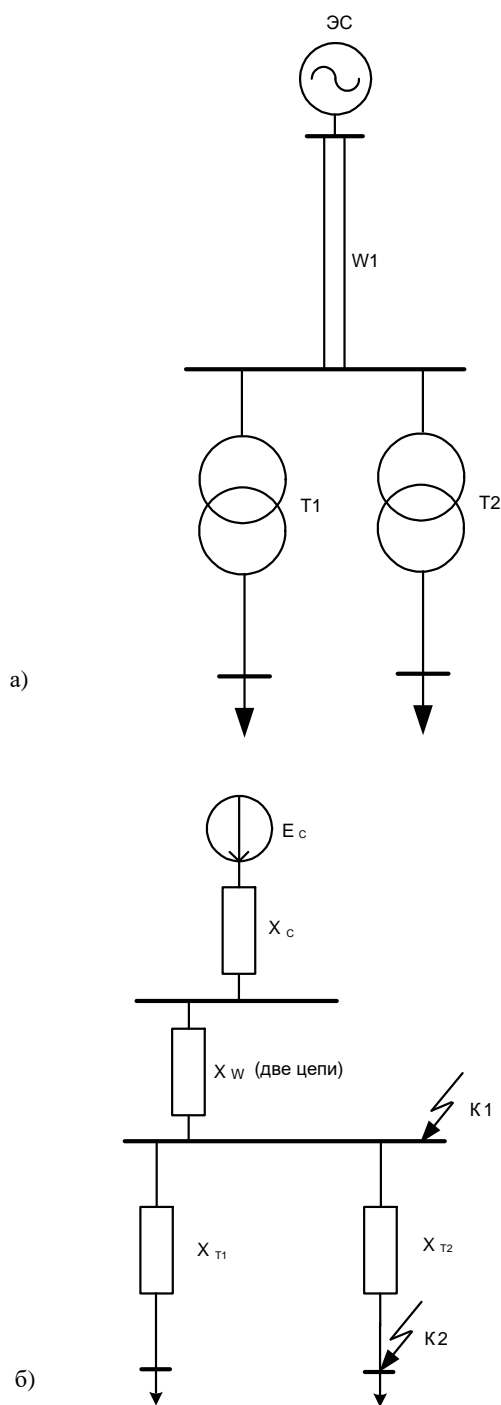


Рисунок 3.2 – Схемы для расчета к.з.

Мощность КЗ на шинах питающей энергосистемы неизвестна, поэтому задаемся типом выключателя на стороне 110 кВ, защищающего вводы в подстанцию ВРС-110 III-31,5/2500 УХЛ1. Его предельная отключающая способность в максимальном режиме составляет 31,5 кА. Для минимального режима возьмем минимально возможную отключающую способность выключателей 110 кВ, равную 12,5 кА. Исходя из этих соображений, вычислим мощности короткого замыкания в максимальном и минимальном режимах:

$$S_{c \max} = \sqrt{3} \cdot I_{K3 \max \text{ ЭС1}} \cdot U_{\text{ср.ном}} = \sqrt{3} \cdot 31,5 \cdot 115 = 6274,17 \text{ МВА}, \quad (3.5)$$

$$S_{c \min} = \sqrt{3} \cdot I_{K3 \min \text{ ЭС1}} \cdot U_{\text{ср.ном}} = \sqrt{3} \cdot 12,5 \cdot 115 = 2489,75 \text{ МВА}. \quad (3.6)$$

Произведем расчет токов КЗ в максимальном режиме. Расчет произведем в относительных (безразмерных) единицах.

Определяем индуктивные сопротивления для каждой электрической системы:

$$X_c = \frac{S_6}{S_c} = \frac{1000 \cdot 10^6}{6274,17 \cdot 10^6} = 0,16, \quad (3.7)$$

Сопротивление ВЛ (двухцепной), выполненных АС-70/11 [18]:

$$X_W = \frac{x_{уд} \cdot l_W \cdot S_6}{2U_{\text{ср.ном}}^2} = \frac{0,422 \cdot 16 \cdot 1000 \cdot 10^6}{2 \cdot (115 \cdot 10^3)^2} = 0,26. \quad (3.8)$$

Сопротивление питающих линий и системы согласно обозначениям на схеме замещения (рисунок 3.2, б):

$$X_{\Sigma} = X_c + X_W = 0,16 + 0,26 = 0,42. \quad (3.9)$$

Сопротивление Т1 и Т2:

$$X_{T1,T2} = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} \cdot (1 \pm \Delta U_{РПН}), \quad (3.10)$$

$$U_{K.cр} = 10,5\%; \quad U_{K.min} = 10\%; \quad U_{K.max} = 11\%.$$

$$X_{T.min} = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{10}{100} \cdot \frac{1000 \cdot 10^6}{6,3 \cdot 10^6} \cdot (1 - 0,16) = 13,33. \quad (3.11)$$

$$X_{T.max} = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{11}{100} \cdot \frac{1000 \cdot 10^6}{6,3 \cdot 10^6} \cdot (1 + 0,16) = 20,25. \quad (3.12)$$

Наименьшее суммарное сопротивление до т. К1:

$$X_{\Sigma_{общ}(K1)} = X_{\Sigma} = 0,42. \quad (3.13)$$

Аналогично т. К2:

$$X_{\Sigma_{общ}(K2)} = X_{\Sigma_{общ}(K1)} + X_{T.min} = 0,42 + 13,33 = 13,75. \quad (3.14)$$

Базисные токи:

$$I_{6(K1)} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{ср.ном}(K1)} = \frac{1000 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 115 \cdot 10^3} = 5020,44 \text{ А.} \quad (3.15)$$

$$I_{6(K2)} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{ср.ном}(K2)} = \frac{1000 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 10^3} = 54985,74 \text{ А.} \quad (3.16)$$

Ток в точке К1:

$$I_{п(K1)}^{(3)} = \frac{I_{6(K1)}}{X_{\Sigma_{общ}(K1)}} = \frac{5020,44}{0,42} = 11953 \text{ А.} \quad (3.17)$$

Ток в точке К2:

$$I_{\Pi(K2)}^{(3)} = \frac{I_{6(K2)}}{X_{\Sigma\text{общ}(K2)}} = \frac{54985,74}{13,75} = 3999 \text{ A.} \quad (3.18)$$

Ударный ток [18] при  $k_{уд} = 1,8$ :

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot I_{\Pi}^{(3)} \cdot k_{уд}, \quad (3.19)$$

Ударный ток в т. К1:

$$i_{уд(K1)} = \sqrt{2} \cdot 11953 \cdot 1,8 = 30423 \text{ A.}$$

Ударный ток в т. К2:

$$i_{уд(K2)} = \sqrt{2} \cdot 3999 \cdot 1,8 = 10178 \text{ A.}$$

Аналогично произведем расчет токов КЗ в минимальном режиме:

$$X_c = \frac{S_{\delta}}{S_c} = \frac{1000 \cdot 10^6}{2489,75 \cdot 10^6} = 0,4.$$

$$X_{\Sigma} = X_c + X_w = 0,4 + 0,26 = 0,66.$$

$$X_{\Sigma\text{общ}(K1)} = X_{\Sigma} = 0,66.$$

$$X_{\Sigma\text{общ}(K2)} = X_{\Sigma\text{общ}(K1)} + X_{Tmax} = 0,66 + 20,25 = 20,91.$$

$$I_{\Pi(K1)}^{(3)} = \frac{5020,44}{0,66} = 7607 \text{ A.}$$

$$I_{\Pi(K2)}^{(3)} = \frac{54985,74}{20,91} = 2630 \text{ A.}$$

$$i_{уд(K1)} = \sqrt{2} \cdot 7607 \cdot 1,8 = 19361 \text{ А.}$$

$$i_{уд(K2)} = \sqrt{2} \cdot 2630 \cdot 1,8 = 6694 \text{ А.}$$

Результаты сведем в таблицу 3.1. В данной таблице вычислим токи двухфазного КЗ в максимальном и минимальном режимах по следующей упрощенной формуле:

$$I_{КЗ}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{КЗ}^{(3)}. \quad (3.20)$$

Таблица 3.1 – Результаты расчета

Точка к.з.	$I_{\max}^{(3)}$ , кА	$I_{\max}^{(2)}$ , кА	$i_{уд.\max}$ , кА	$I_{\min}^{(3)}$ , кА	$I_{\min}^{(2)}$ , кА	$i_{уд.\min}$ , кА
К1	11,953	7,246	30,423	7,607	6,394	19,361
К2	3,999	8,140	10,178	2,630	5,502	6,694

Интеграл Джоуля, характеризующий выделение тепла на ВН:

$$B_K = (I_{п1}^{(3)})^2 \cdot (t_{откл} + T_a) = 11,953^2 \cdot (0,18 + 0,025) = 29,29 \text{ (кА}^2 \cdot \text{с)} \quad (3.21)$$

Интеграл Джоуля, характеризующий выделение тепла на стороне НН:

$$B_K = (I_{п2}^{(3)})^2 \cdot (t_{откл} + T_a) = 3,999^2 \cdot (0,18 + 0,025) = 3,23 \text{ (кА}^2 \cdot \text{с)} \quad (3.22)$$

Таким образом, вычисленные токи КЗ в дальнейшем позволят осуществить выбор и проверку электрооборудования подстанции.



### 3.4 Выбор оборудования 110 кВ

#### 3.4.1 Выбор схем распределительных устройств

На стороне высокого напряжения (110 кВ) применяется система без сборных шин, которые секционируются не выключателем, а перемычкой с разъединителями и двумя заземляющими ножами в них (рисунок 3.3), т.е. схема 110-4Н (для тупиковых ПС) [23]. Выбранная схема предназначена для тупиковых двухтрансформаторных ПС питаемых по 2-м ВЛ.

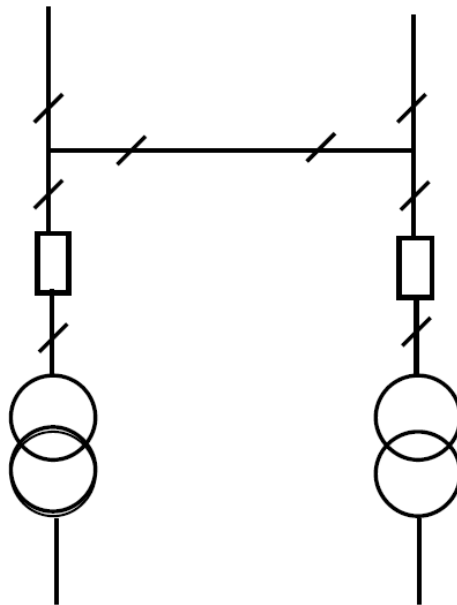


Рисунок 3.3 – Схема ОРУ ВН (110-4Н)

На стороне низкого напряжения (6 кВ) применяется система сборных шин, которые секционируются выключателем (рисунок 5.2), т.е. схема 10-1 – одна секционированная выключателями система шин [23].

Принято 16 ячеек КРУ, в т.ч. ячейки с ТСН (см. графическую часть).

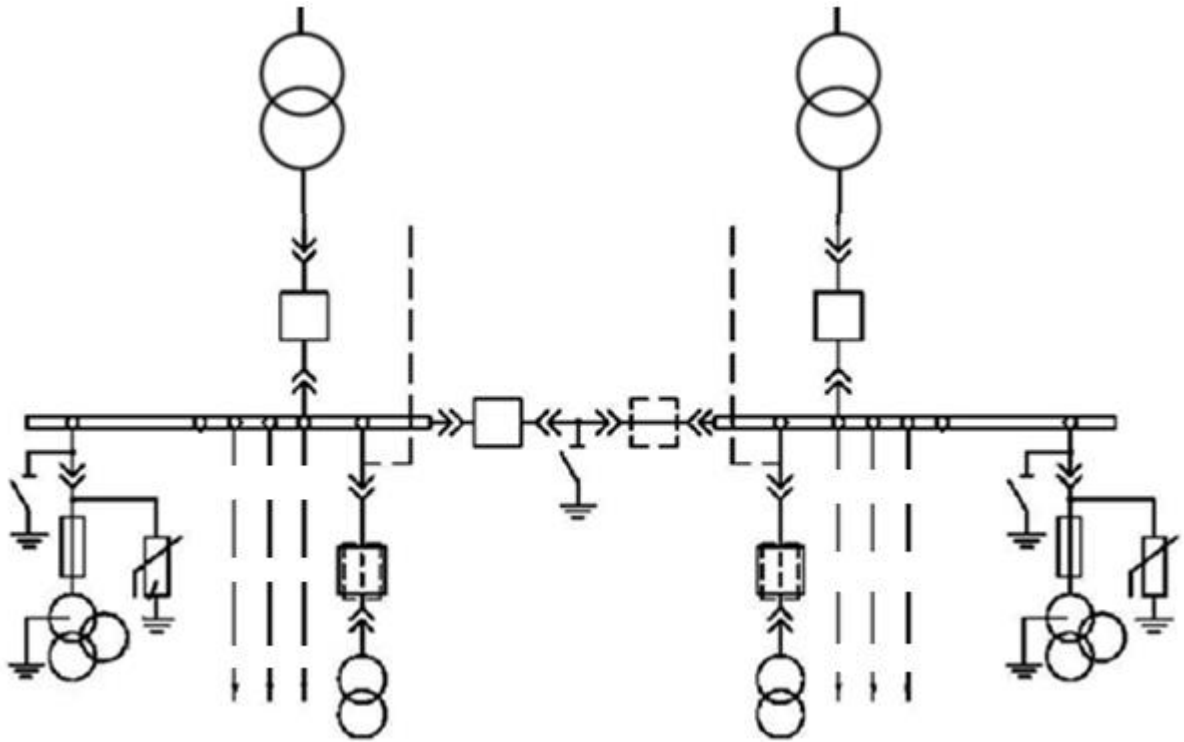


Рисунок 3.4 – Схема 10-1 – одна секционированная выключателями система шин

### 3.4.2 Расчет рабочих максимальных токов

Условие выбора аппарата по напряжению электроустановки:

$$U_{уст} \leq U_{ном}, \quad (3.23)$$

где  $U_{ном}$  – номинальное напряжение аппарата или кабеля.

Предварительно нужно определить  $I_{раб.норм}$  и утяжеленного  $I_{раб.утяж}$ .

Полная мощность, протекающая по одному из трансформаторов в режиме наибольших нагрузок находим по формуле:

$$S_{Т1} = \frac{1}{2} \cdot S_{нагр} = \frac{1}{2} \cdot 7,06 = 3,53 \text{ МВА}. \quad (3.24)$$

Ток, протекающий через один трансформатор в нормальном режиме:

$$I_{\text{норм}} = \frac{3,53 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3} = 23,35 \text{ А.} \quad (3.25)$$

Ток, протекающий через один трансформатор в послеаварийном режиме (в случае отключения второго):

$$I_{\text{утяж}} = 2 * 23,35 = 46,7 \text{ А.} \quad (3.26)$$

В дальнейшем расчетные токи используются для выбора электрооборудования 110 кВ.

### 3.4.3 Выбор и проверка электрических аппаратов высокого напряжения

Выбор разъединителей и выключателей осуществляется по методике [36] в таблицах 3.2-3.3, а по напряжению электроустановки – ОПН (таблица 3.4) [4, 14].

Таблица 3.2 – Расчетная таблица выбора разъединителей ВН [14]

Условие	Тип	Расчет	Справочник
$U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}}$	РГНП.2- 110/1000-40 УХЛ1	$U_{\text{уст}} = 110 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 110 \text{ кВ}$
$I_{\text{расч}} \leq I_{\text{ном}}$		$I_{\text{расч}} = 46,7 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$
$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{пр.с}}$		$i_{\text{уд}} = 30,423 \text{ кА}$	$i_{\text{пр.с}} = 80 \text{ кА}$
$B_k \leq I_{\text{пр.т}}^2 \cdot t_{\tau}$		$B_k = 29,29 \text{ (кА}^2 \cdot \text{с)}$	$I_{\text{пр.т}}^2 \cdot t_{\tau} =$ $= 25^2 \cdot 3 = 1875 \text{ (кА}^2 \cdot \text{с)}$

Таблица 3.3 – Расчетная таблица выбора выключателей ВН [1]

Условие	Тип	Расчет	Справочник
$U_{уст} \leq U_{ном}$	ВРС-110 III- 31,5/2500 УХЛ1	$U_{уст}=110$ кВ	$U_{ном}=110$ кВ
$I_{расч} \leq I_{ном}$		$I_{расч}=46,7$ А	$I_{ном}= 2500$ А
$I_n^{(3)} \leq I_{нр.с}$		$I_n^{(3)}=11,953$ кА	$I_{нр.с}=20$ кА
$i_{уд} \leq i_{нр.с}$		$i_{уд}=30,423$ кА	$i_{нр.с}=52$ кА
$B_k \leq I_{нр.т}^2 \cdot t_\tau$		$B_k = 29,29$ (кА <sup>2</sup> · с)	$I_{нр.т}^2 \cdot t_\tau=20^2 \cdot 3 =1200$ (кА <sup>2</sup> · с)

Таблица 3.4 – Расчетная таблица выбора ОПН ВН [6]

Условие	Тип	Расчет	Справочник
$U_{уст}=U_{ном}$	ОПНП-П1- 110/83/10/3 III УХЛ1	$U_{уст}=110$ кВ	$U_{ном}=110$ кВ

### 3.4.4 Выбор контрольно-измерительной аппаратуры

Вторичная нагрузка ТТ:

$$r_2 = r_{приб} + r_{пров} + r_k \text{ (Ом)}, \quad (3.27)$$

Сопротивление приборов:

$$r_{приб} = \frac{S_{приб}}{I_{2ном}^2} \text{ (Ом)}, \quad (3.28)$$

Условие соответствия работы ТТ в заданном классе точности:

$$r_{приб} + r_{пров} + r_k \leq Z_{2ном} \text{ (Ом)}, \quad (3.29)$$

ИЛИ

$$r_{\text{пров}} \leq Z_{2\text{ном}} - r_{\text{приб}} - r_{\text{к}} \text{ (Ом)}. \quad (3.30)$$

Сечение проводов:

$$q = \frac{\rho \cdot l_{\text{расч}}}{r_{\text{пр}}} \text{ (мм}^2\text{)}. \quad (3.31)$$

В таблице 5.4 производим выбор приборов.

На основании приведенных формул производим расчеты:

$$\begin{aligned} r_{\text{приб}} &= \frac{12}{5^2} = 0,56 \text{ (Ом)}, \\ r_{\text{пров}} &\leq 1,2 - 0,56 - 0,1 \leq 0,54 \text{ (Ом)}. \\ q &= \frac{\rho \cdot l_{\text{расч}}}{r_{\text{пров}}} = \frac{\rho \cdot l}{r_{\text{пров}}} = \frac{0,0283 \cdot 80}{0,54} \approx 5 \text{ мм}^2. \end{aligned} \quad (3.32)$$

Таблица 3.5 – Измерительные приборы ТТ для ВН

Устройство измерения электрической величины	Распределение подключений		
	А	В	С
Ваттметр	0,4	-	0,4
Варметр	0,4	-	0,4
Счетчик Wh	2,4	-	2,4
Счетчик Wq	0,4	-	0,4
Амперметр	-	9	-
Ваттметр	9	-	9
Итого	12	9	12

$$r_{\text{пров}} = \frac{\rho \cdot l_{\text{расч}}}{q} = \frac{\rho \cdot l}{q} = \frac{0,0283 \cdot 80}{5} = 0,45 \text{ (Ом)}.$$

$$r_2 = 0,56 + 0,45 + 0,1 = 1,11 \text{ (Ом)}.$$

Выбор ТТ ВН представлен в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Выбор ТТ ВН [28]

Условие	Тип	Расчет	Справочник
$U_{сети.ном} \leq U_{ном}$	ТОГФ-110-II- 0,2S/0,5/5P/5P/5P -37,5-75-150/1 УХЛ1	$U_{сети.ном} = 110$ кВ	$U_{ном} = 110$ кВ
$I_{ном} \leq I_{ном1}$		$I_{расч} = 23,35$ А	$I_{ном} = 150$ А
$i_{уд} \leq i_{дин}$		$i_{уд} = 30,423$ кА	$i_{дин} = 126$ кА
$B_k \leq I_{пр.т}^2 \cdot t_\tau$		$B_k = 29,29$ (кА <sup>2</sup> · с)	$I_{пр.т}^2 \cdot t_\tau = 12^2 \cdot 3 = 432$ (кА <sup>2</sup> · с)
$Z_2 \leq Z_{2ном}$		$Z_2 = 1,11$ (Ом)	$Z_{2ном} = 1,2$ (Ом)

Измерительные приборы для ТН приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Измерительные приборы

Устройство измерения электрической величины		S, ВА	контакты	cosφ	sinφ	Кол-во	Общая потребляемая мощность	
							P, Вт	Q, ВА
Вольтметр (СШ)		2	1	1	0	1	2	-
Ваттметр	Ввод 110 кВ от трансформатора	1,5	3	1	0	1	4,5	-
Счетчик активный		3 Вт	3	0,38	0,925	1	9	14,5
Счетчик реакт.		3 Вт	3	0,38	0,925	1	9	14,5
Счетчик акт.	Линии 110 кВ	3 Вт	3	0,38	0,925	4	36	58
Счетчик реакт.		3 Вт	3	0,38	0,925	4	36	58
Итого							96,5	145

Вторичная нагрузка ТН (таблица 3.8) по [26]:

$$S_2 = \sqrt{P_{приб}^2 + Q_{приб}^2} \quad (\text{ВА}). \quad (3.33)$$

$$S_2 = \sqrt{96,5^2 + 145^2} = 174,2 \quad (\text{ВА}).$$

Таблица 3.8 – Расчетная таблица выбора трансформатора напряжения [26]

Условие	Тип	Расчет	Справочник
$U_{сети.ном} \leq U_{ном}$	ЗНОГ-110 УХЛ1	$U_{сети.ном} = 110$ кВ	$U_{ном} = 110/\sqrt{3}$ кВ
$S_2 \leq S_{2ном}$		$S_2 = 174,2$ (ВА)	$S_{2ном} = 400$ (ВА)

### 3.4.5 Выбор и проверка шин высокой стороны

Выбираем провода марки АС-70/11 (таблица 3.9), соразмерные с проводами питающей ЛЭП 110 кВ.

Таблица 3.9 – Параметры шин высокой стороны

<b>F, мм<sup>2</sup></b>	<b>I<sub>доп</sub>, А</b>	<b>Расчетный ток I<sub>max</sub>, А</b>
70	265	46,7

Условие проверки по температуре:

$$\vartheta_{\text{к}} \leq \vartheta_{\text{к,доп}} \text{ (}^{\circ}\text{C)}, \quad (3.34)$$

$$\vartheta_{\text{н}} = \vartheta_0 + (\vartheta_{\text{доп}} - \vartheta_{\text{о,ном}}) \cdot \left( \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{доп}}} \right)^2 \quad (3.35)$$

$$\vartheta_{\text{н}} = 35^{\circ} + (70^{\circ} - 25^{\circ}) \cdot \left( \frac{46,7}{265} \right)^2 = 36^{\circ}\text{C}.$$

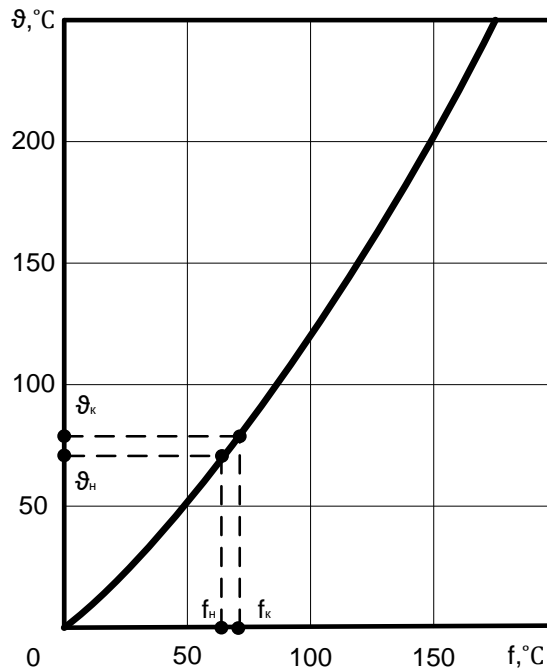


Рисунок 3.5 – Кривая накаливания проводов

По кривой рисунка 3.5, находим по температуре величину:

$$f_{\text{н}} = 36 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Сложная функция:

$$f_{\text{к}} = f_{\text{н}} + \frac{k \cdot B_{\text{к}}}{g^2}, \quad (3.36)$$

$$f_{\text{к}} = 36 + \frac{1,054 \cdot 29,29 \cdot 10^6}{70^2} \approx 126 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Теперь в обратном порядке идем по линии рисунка 3.5 и находим нужную величину:

$$\vartheta_{\text{к}} = 155 \text{ }^{\circ}\text{C}, \vartheta_{\text{к}} \leq \vartheta_{\text{к,доп}} \text{ (}^{\circ}\text{C)}, \text{ т. е } 155^{\circ}\text{C} < 200^{\circ}\text{C}.$$

Выбранные высоковольтные электрические аппараты, шины и контрольно-измерительная аппаратура отображаются на однолинейной схеме подстанции (графическая часть).

### **3.5 Выбор оборудования 6 кВ**

#### **3.5.1 Расчет максимальных рабочих токов, выбор и проверка сборных шин на стороне НН**

Рассчитаем  $I_{\text{норм}}$  и  $I_{\text{утяж}}$  для шины низкого напряжения, отходящих от трансформаторов:

$$I_{\text{норм}} = \frac{S_{\text{нагр}}}{n \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{7,06 \cdot 10^6}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 340 \text{ А.} \quad (3.37)$$



$$I_{\text{утяж}} = \frac{S_{\text{нагр}}}{(n-1) \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{7,06 \cdot 10^6}{1 \cdot \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 680 \text{ А.} \quad (3.38)$$

По значению  $I_{\text{утяж}}$  выбираем сечение шины ШАТ 50х6 [13]:

$$S = 50 \cdot 6 = 300 \text{ мм}^2.$$

$$I_{\text{доп}} = 740 \text{ А.}$$

В соответствии с методикой проверки шин ВН, по аналогии производим необходимую проверку:

$$\vartheta_{\text{н}} = 35^\circ + (70^\circ - 25) \cdot \left(\frac{680}{740}\right)^2 = 73 \text{ (}^\circ\text{C)}, \quad (3.39)$$

Далее все аналогично п.3.4.5:

$$f_{\text{н}} = 73 \text{ }^\circ\text{C.}$$

$$f_{\text{к}} = 73 + \frac{1,054 \cdot 3,23 \cdot 10^6}{300^2} \approx 111 \text{ (}^\circ\text{C)}. \quad (3.40)$$

$$\vartheta_{\text{к}} = 125 \text{ }^\circ\text{C, } \vartheta_{\text{к}} \leq \vartheta_{\text{к,доп}} \text{ (}^\circ\text{C)}, \text{ т. е } 125 \text{ }^\circ\text{C} < 200 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Условие выполнено.

Наибольшее удельное усилие:

$$f = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i_{\text{уд}}^2}{a} = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot \frac{(6694)^2}{0,26} = 29,85 \text{ (Н/м)}, \quad (3.41)$$

Изгибающий момент от данного усилия [31]:

$$M = \frac{f \cdot l^2}{10} = \frac{29,85 \cdot 0,7^2}{10} = 1,46 \text{ (Н} \cdot \text{м)}, \quad (3.42)$$

Механическое напряжение и вспомогательные механические величины найдем как:

$$\sigma_{\text{расч}} = \frac{M}{W} \text{ (МПа)}, \quad (3.43)$$

$$M = \frac{f \cdot l^2}{10} = \frac{29,85 \cdot 0,7^2}{10} = 1,46 \text{ (Н} \cdot \text{м)} \quad (3.44)$$

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{0,6 \cdot 5^2}{6} = 2,5 \text{ (см}^3\text{)}. \quad (3.45)$$

$$\sigma_{\text{расч}} = \frac{M}{W} = \frac{1,46}{2,5} = 0,584 \text{ (МПа)}. \quad (3.46)$$

$$\sigma_{\text{расч}} \leq \sigma_{\text{доп}} = 40 \text{ МПа}, \quad (3.47)$$

Условие выполнено.

### 3.5.2 Выбор и проверка электрических аппаратов низкого напряжения

Выбор и проверка электрических аппаратов низкого напряжения осуществляется аналогично аппаратам высокого напряжения (см. п.3.4.3), таблицы 3.10-3.12 [2, 6].

Таблица 3.10 – Выбор ячеек ВВ/ТЕL на вводах

Условие	Марка	Расчет	Справочник
$U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}}$	ВВ/ТЕL-6- 31,5/1000УЗ	$U_{\text{уст}}=6 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}}=6 \text{ кВ}$
$I_{\text{расч}} \leq I_{\text{ном}}$		$I_{\text{расч}}=680 \text{ А}$	$I_{\text{ном}}=1000 \text{ А}$
$I_{\text{п}}^{(3)} \leq I_{\text{пр.с}}$		$I_{\text{п}}^{(3)}=3,999 \text{ кА}$	$I_{\text{пр.с}}=31,5 \text{ кА}$
$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{пр.с}}$		$i_{\text{уд}}=10,178 \text{ кА}$	$i_{\text{пр.с}}=80 \text{ кА}$
$B_k \leq I_{\text{пр.т}}^2 \cdot t_{\text{т}}$		$B_k=3,23 \text{ (кА}^2 \cdot \text{с)}$	$I_{\text{пр.т}}^2 \cdot t_{\text{т}}=31,5^2 \cdot 4 = 3969 \text{ (кА}^2 \cdot \text{с)}$

Таблица 3.11 – Выбор ячеек ВВ/ТЕL между сек.1 и сек.2

Условие	Марка	Расчет	Справочник
$U_{уст} \leq U_{ном}$	ВВ/ТЕL-6-31,5/630УЗ	$U_{уст}=6$ кВ	$U_{ном}=6$ кВ
$I_{расч} \leq I_{ном}$		$I_{расч}=340$ А	$I_{ном}=630$ А
$I_{п}^{(3)} \leq I_{пр.с}$		$I_{п}^{(3)}=3,999$ кА	$I_{пр.с}=31,5$ кА
$i_{уд} \leq i_{пр.с}$		$i_{уд}=10,178$ кА	$i_{пр.с}=80$ кА
$B_k \leq I_{пр.т}^2 \cdot t_{\tau}$		$B_k=3,23$ (кА <sup>2</sup> · с)	$I_{пр.т}^2 \cdot t_{\tau}=31,5^2 \cdot 4 = 3969$ (кА <sup>2</sup> · с)

Таблица 3.12 – Выбор ОПН

Условие	Марка	Расчет	Справочник
$U_{уст} = U_{ном}$	ОПНП-П1-6/6,9/10/2 УХЛ1	$U_{уст} = 6$ кВ	$U_{ном} = 6$ кВ

### 3.5.3 Выбор контрольно-измерительной аппаратуры

Выбор контрольно-измерительной аппаратуры на стороне НН производится по аналогии со стороной ВН. Расчетная таблица выбора ТТ на вводах НН показана в таблице 3.13, а в секционной перемычке – в таблице 3.14 [30], аналогично и выбор ТН на НН, таблица 3.15 [25].

Таблица 3.13 – Выбор ТТ на вводах НН

Выполняемое неравенство	Марка	Расчет	Справочник
$U_{сети ном} \leq U_{ном},$ кВ	ТЛО-6	$U_{сети ном}=6$ кВ	$U_{ном} = 6$ кВ
$I_{раб.ном} \leq I_{ном},$ А		$I_{раб.ном}=680$ А	$I_{ном} = 1000$ А
$i_{уд} \leq i_{дин},$ кА		$I_{уд}=10,178$ кА	$I_{дин}=100$ кА
$B_k \leq I_{пр.т}^2 \cdot t,$ кА <sup>2</sup> с		$B_k = 3,23$ кА <sup>2</sup> с	$I_{пр.т}^2 \cdot t=31,5^2 \cdot 1 = 992,25$ кА <sup>2</sup> с
$Z_2 \leq Z_{2ном},$ Ом		0,11	$Z_{2ном}=0,4$ Ом

Таблица 3.14 – Выбор ТТ в секционной перемычке

Выполняемое неравенство	Марка	Расчет	Справочник
$U_{сети ном} \leq U_{ном},$ кВ	ТЛО-6	$U_{сети ном}=6$ кВ	$U_{ном} = 6$ кВ
$I_{раб.ном} \leq I_{ном},$ А		$I_{раб.ном}=340$ А	$I_{ном} = 600$ А
$i_{уд} \leq i_{дин},$ кА		$I_{уд}=10,178$ кА	$I_{дин}=100$ кА
$B_k \leq I_{пр.т}^2 \cdot t,$ кА <sup>2</sup> с		$B_k = 3,23$ кА <sup>2</sup> с	$I_{пр.т}^2 \cdot t=31,5^2 \cdot 1 = 992,25$ кА <sup>2</sup> с
$Z_2 \leq Z_{2ном},$ Ом		0,11	$Z_{2ном}=0,4$ Ом

Таблица 3.15 – Выбора ТН на НН, установленных на шинах 6 кВ

Выполняемое неравенство	Марка	Расчет	Справочник
$U_{сети.ном} \leq U_{ном}$	ЗНОЛП.4-6 У2	$U_{сети.ном} = 6 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 6 \text{ кВ}$
$S_2 \leq S_{2ном}$		$S_2 = 174,2 \text{ (ВА)}$	$S_{2ном} = 300 \text{ (ВА)}$

Выбранные высоковольтные электрические аппараты и контрольно-измерительная аппаратура отображаются на однолинейной схеме подстанции (графическая часть).

### 3.6 Выбор ТСН

Щит собственных нужд (ЩСН) будут запитывать на ПС следующие виды (группы) оборудования:

- обогрев выключателей, шкафов ОРУ;
- освещение (шкафы управления наружным, охранным и ремонтным освещением);
- розетки распределительных шкафов;
- блоки управления разъединителей;
- шкафы приводов главных ножей разъединителей;
- шкафы приводов выключателей;
- шкафы зажимов трансформаторов тока;
- шкафы зажимов трансформаторов напряжения;
- шкафы сетей связи;
- шкафы центральной сигнализации;
- шкафы охлаждения трансформаторов;
- шкафы АСУ ТП;
- контроллер РПН SHM-K трансформаторов;
- приводы SHM-D регулирования напряжения со стороны высоковольтных вводов трансформаторов;

- щит обогрева здания ОПУ;
- шкафы АИИС КУЭ;
- шкаф ППУ (панель противопожарных устройств);
- шкаф оперативного тока (ШОТ).

ЩСН питается от ТСН, мощность которого необходимо выбрать по таблице электронагрузок (таблица 3.16).

Таблица 3.16 – Нагрузка собственных нужд ПС

Наименование	P <sub>уст</sub>		cosφ	tgφ	Вид мощности	
	кВт × кол-во	всего, кВт			акт.	реакт.
Охлаждение ТМН-6300 /110	3x2	6	0,85	0,62	6	3,72
Подогрев выключателей	5x2	10	1	0	10	-
Подогрев КРУ	2x16	32	1	0	32	-
Питание приводов разъединителей и выключателей	3x16	48	1	0	48	-
Отопление и освещение ОПУ	-	10	1	0	10	-
Освещение, вентиляция КРУ	-	17	1	0	17	-
Освещение ОРУ 110 кВ	-	15	1	0	15	-
Итого					138	3,72

Нагрузка СН с учетом коэффициента спроса:

$$S_{сн} = k_c \cdot \sqrt{\sum P^2 + \sum Q^2} = 0,9 \cdot \sqrt{138^2 + 3,72^2} = 124,3 \text{ кВА}. \quad (3.48)$$

Мощность ТСН:

$$S_{тсн} \geq \frac{S_{сн}}{2 \cdot 0,7} \geq \frac{124,3}{2 * 0,7} = 88,8 \text{ (кВА)}. \quad (3.49)$$

По справочнику [18] выбираем ближайшее большее значение мощности трансформатора:  $S_{ТСН\text{ ном}} = 100 \text{ кВА}$ , тип трансформатора ТСН: ТС-100-6/0,4 кВ; ПБВ±2х2,5%,  $U_k=4,5\%$ ;  $I_{хх}=0,9\%$ ; Д/У<sub>Н</sub>-11; У3.

### 3.7 Выбор системы оперативных токов

Система питания оперативных токов ПС базируется на использовании выпрямительных агрегатов, которые питаются от ЩСН и снабжают всю необходимую нагрузку постоянного тока:

- шинки оперативного питания;
- центральная сигнализация;
- комплекты оперативных блокировок;
- защита силовых трансформаторов;
- устройства РПН.

Используемые выпрямительные агрегаты типа Flatpack 2 Power shelf 4xFP2 (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 – Выпрямительный агрегат типа Flatpack 2 Power shelf 4xFP2

Технические характеристики выпрямительного агрегата типа Flatpack 2 Power shelf 4xFP2 представлены в таблице 3.17.

Таблица 3.17 – Технические характеристики выпрямительного агрегата типа Flatpack 2 Power shelf 4xFP2

<b>Параметр</b>	<b>Значение</b>
Максимальное входное напряжение переменного тока	300 В переменного тока
Конфигурация сети	230VAC однофазный; 230VAC 3 фазы (Δ); 230/400 В переменного тока 3 фазы (Y)
Выход постоянного тока	
Ток (максимальный)	600 А
Максимальное напряжение, В	48 В постоянного тока
Максимальная мощность	32 кВт
Распределение батарей	
Положения выключателя, не более	6
Номинальный ток выключателя, не более	250 А
LVBD	Да
Распределение нагрузки постоянного тока	
Положения выключателя, не более	18
Номинальный ток выключателя, не более	125 А
LVBD	Да
Рабочая температура	-40 – +60 °С
Размеры ШxВxГ	482 x 267 x 380 мм
Вес	5 кг

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы над ВКР реконструирована электрическая часть ПС «Екатерининская» 110/6 кВ ПАО «Россети Урал» с учетом применения современного высоковольтного оборудования.

В ходе выполнения работы дана характеристика объекта и питающей линии электропередачи. Произведен выбор силовых трансформаторов и трансформаторов собственных нужд в соответствии с электрическими нагрузками. Расчет токов короткого замыкания произведен с целью выбора высоковольтного оборудования электрической подстанции. На основании расчетных рабочих и максимальных токов, а также токов КЗ выбраны трансформаторы тока, трансформаторы напряжения, высоковольтные выключатели и разъединители на высоком и низком напряжении. Для управления выключателями и разъединителями выбрана система оперативных токов подстанции.

Практическая значимость исследований обусловлена тем, что предложенные виды электрооборудования и технические решения схемы электроподстанции могут быть использованы для проектирования и реконструкции подстанций с высшим напряжением 110-220 кВ и низшим напряжением 6-10 кВ.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Выключатели элегазовые серии ВГТ-УЭТМ® на 35, 110 и 220 кВ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dv-electro.ru/images/opros/VGT-35,110,220.pdf> (дата обращения 11.05.2024).
2. Выключатель ВВ/TEL-10-31,5/1600УЗ [сайт]. – URL: <http://forca.ru/spravka/spravka/tehnicheskie-harakteristiki-rossiyskih-vakuumnyh-vyklyuchateley-10-kv.html> (дата обращения 11.05.2024).
3. Выключатель ВРС-110 III-31,5/2500 УХЛ1 [сайт]. – URL: <https://dv-electro.ru/images/opros/vrs-110.pdf> (дата обращения 11.05.2024).
4. Выключатель элегазовый колонковый ВГТ-110 (У1, УХЛ1) (трехполюсное/однополюсное исполнение) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://zeto.ru/products\\_and\\_services/high\\_voltage\\_equipment/elegazovye-kolonkovye-vyklyuchateli-tipa-vgt-110](https://zeto.ru/products_and_services/high_voltage_equipment/elegazovye-kolonkovye-vyklyuchateli-tipa-vgt-110) (дата обращения 11.05.2024).
5. Ограничитель перенапряжения ОПНП-П1-10/11,5/10/2 УХЛ1 [сайт]. – URL: <http://www.razrad.sp.ru/opn10.html> (дата обращения 11.05.2024).
6. Ограничитель перенапряжения ОПНП-П1-110/83/10/3 III УХЛ1 [сайт]. – URL: <http://www.razrad.sp.ru/opn110.html> (дата обращения 11.05.2024).
7. Правила устройства электроустановок. – СПб.: ДЕАН, 2013. – 676 с.
8. Разъединители наружной установки 110 кВ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.electroshield.ru/catalog/razyediniteli-i-vla/razediniteli-naruzhnoy-ustanovki-110-kv/> (дата обращения 11.05.2024).
9. Разъединители наружной установки серии РГ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://zeto.ru/products\\_and\\_services/high\\_voltage\\_equipment/rg-110-kv](https://zeto.ru/products_and_services/high_voltage_equipment/rg-110-kv) (дата обращения 11.05.2024).
10. Разъединители переменного тока на напряжение 110 кВ серии РН. Руководство по эксплуатации ОГК.412.235 РЭ [Электронный ресурс]. –

Режим доступа:  
[http://demsli.by/sites/default/files/demslifiels/re\\_rn110\\_elsh.ru.pdf](http://demsli.by/sites/default/files/demslifiels/re_rn110_elsh.ru.pdf) (дата обращения 11.05.2024).

11. Разъединители серии РГП на напряжение 110 кВ. Руководство по эксплуатации ИВЕЖ.674214.038-01 РЭ [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.elec.ru/viewer?url=/files/127/000000087/attfile/rukovodstvo-po-ekspluatatsii-razedinitelej-serii-rgp-na-napryazhenie-110-kv.pdf> (дата обращения 11.05.2024).

12. Разъединители типа РГД-110 на напряжение 110 кВ [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<http://www.elektrozavod.ru/sites/default/files/pcomplexes/ea/production/rgd110/rgd-110.pdf> (дата обращения 11.05.2024).

13. Разъединители типа РПД(РПДО)-УЭТМ на напряжение 110 кВ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dv-electro.ru/raz-ediniteli-i-vyklyuchateli-nagruzki/raz-ediniteli-110-kv> (дата обращения 11.05.2024).

14. Разъединитель РГНП.2-110/1000-40 УХЛ1 [сайт]. – URL: [http://www.zaokurs.ru/downloads/pdf/raz\\_proshl\\_pok.pdf](http://www.zaokurs.ru/downloads/pdf/raz_proshl_pok.pdf) (дата обращения 11.05.2024).

15. РД 153-34.0-20.527-98 Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования.

16. СО 153-34.20.501-2003 Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации.

17. СП 76.13330.2016 «Электротехнические устройства. Актуализированная редакция СНиП 3.05.06-85.

18. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : ЭНАС, 2012. – 376 с.

19. СТО 569447007-29.130.15.114-2012 Руководящие указания по проектированию заземляющих устройств подстанций напряжением 6-750 кВ.

20. СТО 569447007-29.130.15.114-2012 Руководящие указания по

проектированию заземляющих устройств подстанций напряжением 6-750 кВ.

21. СТО 56947007-29.240.043-2010 Руководство по обеспечению электромагнитной совместимости вторичного оборудования и систем связи электросетевых объектов.

22. СТО 56947007-29.240.044-2010 Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства.

23. СТО 56947007-29.240.30.010-2008. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35-750 кВ. Типовые решения. – Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС», Дата введения - 2007-12-20.

24. Технический циркуляр №11/2006 от 12.10.2006 г. «О заземляющих электродах и заземляющих проводниках».

25. Трансформатор напряжения ЗНОЛП.4-10 У2 [сайт]. – URL: <http://www.ielectro.ru/gelem90938.html> (дата обращения 11.05.2024).

26. Трансформатор напряжения НАМИ-110 УХЛ1 [сайт]. – URL: <http://www.ielectro.ru/gelem90931.html> (дата обращения 11.05.2024).

27. Трансформатор тока ТОГФ-110 с азотной изоляцией:сайт / Каталог. – URL:<http://zaokurs.ru/uploads/files/89/togf-110sazotnoyizolyaciey.pdf>(дата обращения 25.05.2023).

28. Трансформатор тока ТОГФ-110-II [сайт]. – URL: <http://www.tdtransformator.ru/catalog/izmeritelnye/toka/ot-110-kv/tfzm-110-tfzm-110-tfzm-500.htm> (дата обращения 11.05.2024).

29. Трансформатор тока ТРГ-УЭТМ 110/220 кВ: сайт / Каталог. – URL:<https://dv-electro.ru/izmeritelnye-transformatory/transformatory-110-220-kv>(дата обращения 25.05.2023).

30. Трансформаторы напряжения ЗНГ-УЭТМ®-110:сайт / Каталог. – URL: <http://www.uetm.ru/katalog-produktsii/item/znguetm110/>(дата обращения

25.05.2023).

31. Трансформаторы напряжения. Общие технические условия : ГОСТ 1983-2001. – Введ. 01.01.2003. – URL: [http://standartgost.ru/g/ГОСТ\\_1983-2001](http://standartgost.ru/g/ГОСТ_1983-2001) (дата обращения 25.05.2023).

32. Трансформаторы напряжения. Общие технические условия : ГОСТ 1983-2001. – Введ. 01.01.2003.

33. Трансформаторы тока ТРГ-УЭТМ®-110:сайт / Каталог. – URL: <http://www.uetm.ru/katalog-produktsii/item/trguetm110/>(дата обращения 25.05.2023).

34. Трансформаторы тока элегазовые с фарфоровой изоляцией ТОГФ-110, 220 (УХЛ1):сайт / Каталог. – URL: [https://zeto.ru/products\\_and\\_services/high\\_voltage\\_equipment/elegazovye-transformatory-toka-serii-togf-110-220-330-500](https://zeto.ru/products_and_services/high_voltage_equipment/elegazovye-transformatory-toka-serii-togf-110-220-330-500)(дата обращения 25.05.2023).

35. Трансформаторы тока. Общие технические условия : ГОСТ 7746-2001. – Введ. 01.01.2003.

36. Электрические станции и подстанции. Проектирование электрической части подстанции: метод. указания к выполнению курсового проектирования / сост. П. В. Валь ; Сиб. федер. ун-т, ХТИ – филиал СФУ. – Абакан : Ред.-изд. сектор ХТИ – филиала СФУ, 2014. – 38 с.

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО  
«Сибирский федеральный университет»  
институт

«Электроэнергетика, машиностроение и автомобильный транспорт»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой

А.С. Торопов  
подпись                      инициалы, фамилия

« 25 »    06    2024 г.

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

код – наименование направления

Реконструкция подстанции 110/6 кВ «Екатерининская» ПАО «Россети Урал»  
тема

Руководитель А.В. Коловский    доцент, к.т.н.  
подпись, дата                      должность, ученая степень

Выпускник А.С. Попков  
подпись, дата                      инициалы, фамилия

Нормоконтролер И.А. Кычакова  
подпись, дата                      инициалы, фамилия

Абакан 2024