МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

Электроэнергетика и электротехника

(полное название факультета (института))

Электроэнергетические системы и сети

(полное название кафедры)

КУРСОВАЯ РАБОТА

Выполнил:
Нусамиев Наиль Шамильевич
студент _4_курса группы ЭС-3-16____

(подпись)

Руководитель работы:
Гарифуллин М.Ш., профессор каф ЭСиС

(ФИО, должность, кафедра)

Работа выполнена и

защищена с оценкой_____Дата защиты 13.05.2020 _____

(подпись руководителя) (дата)

Члены комиссии: доцент _____ Муратаева Г.А
(должность) (подпись) (И.О. Фамилия)

доцент _____ Сабитов А.Х
(должность) (подпись) (И.О. Фамилия)

ст.преп _____ Гиззатова И.Д
(должность) (подпись) (И.О. Фамилия)

Казань, 2020г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

КГЭУ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

Институт (факультет) ИЭЭ Кафедра ЭСиС

З А Д А Н И Е

на выполнение курсовой работы/курсового проекта

Студент Нусамиев Наиль Шамильевич, 4 курс, группа ЭС-1-16
(фамилия и.о. / курс / группа)

Тема курсовой работы/курсового проекта Проектирование понижающей подстанции трёх классов напряжения

Научный руководитель Гарифуллин Марсель Шарифьянович, профессор, д.т.н, доцент
(фамилия и.о., должность, ученая степень, ученое звание)

Содержание разделов (перечень подлежащих разработке вопросов) Выбор силового трансформатора и компенсирующих устройств для понижающей подстанции, выбор оборудования на стороне ВН, выбор оборудования на стороне СН, выбор оборудования на стороне НН, выполнение однолинейной схемы ПС, выполнение чертежа плана-разреза ПС

Перечень графического/демонстрационного материала Однолинейная схема понижающей ПС, чертеж плана-разреза ПС

Рекомендуемая литература ПУЭ, 7-е изд. -М.:ЭНАС, 2002, Рожкова Л.Д. Электрооборудование ЭСиП: учебник для студ.проф.Образования/ Л.Д.Рожкова, Л.К. Карнеева, Т.В.Чиркова -4-е изд.стер.- М.: Издательский центр “Академия; Справочник по проектированию электрических сетей. Под ред. Файбисовича Д. Л. 3-е издание, 2009г. , 392 стр., изд-во: НЦ ЭНАС.

Контрольные сроки представления отдельных разделов курсовой работы/курсового проекта:

25 % - Выбор трансформатора и КУ “ 28 ” февраля 2020 г.
50 % - Выбор оборудования на ВН и СН “ 16 ” марта 2020 г.
75 % - Выбор оборудования на НН “ 3 ” апреля 2020 г.
100 % - Выполнение схем ПС “ 20 ” апреля 2020 г.

Дата выдачи задания “ 12 ” февраля 2020 г.

Научный руководитель _____ Гарифуллин М.Ш.
(подпись / Фамилия И.О.)

Задание принял(а) к исполнению студент(ка) очной формы обучения 4 курса ЭС-1-16 Группы Н.Ш.Нусамиев
(личная подпись)(инициалы, фамилия)

Зав.кафедрой к.т.н., доцент Максимов В.В.
(должность, ученое звание, ученая степень / подпись / фамилия)

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
1. Исходные данные 5
2. Выбор компенсирующих устройств и трансформаторов 5
3. Расчет токов трехфазного короткого замыкания 6
4. Выбор оборудования на стороне ВН 8
5. Выбор оборудования на стороне СН 18
6. Выбор оборудования на стороне НН 30
6.1. Выбор трансформатора собственных нужд 42
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 45

ВВЕДЕНИЕ

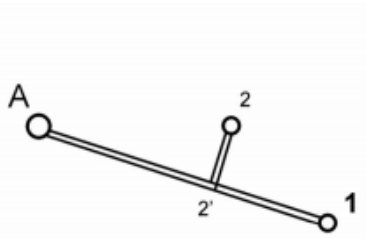
Электрическая энергия широко применяется во всех областях народного хозяйства. Этому способствует универсальность и простота ее использования, возможность производства в больших количествах промышленным способом и передачи на большие расстояния. Энергетика занимает ведущее место среди отраслей народного хозяйства. Уровень развития энергетики и электрификации в наиболее обобщенном виде отражает достигнутый технико-экономический потенциал страны.

Электрическая подстанция представляет собой большую электрическою схему соединения различных электрических аппаратов (трансформаторов, коммутационных аппаратов, компенсирующих устройств, измерительной аппаратуры, средств автоматики и релейной защиты, и многое другое). Подстанция включает в себя распределительные устройства, которые в свою очередь подразделяются на открытые и закрытые. При проектировании новой подстанции и модернизации уже действующей необходимо руководствоваться новыми разработками отечественной и зарубежной промышленности. Одним из направлений по внедрению новых технологий является внедрение вакуумных выключателей, позволяющие заметно уменьшить размеры распределительных устройств.

Целью данного курсового проекта является выбор основного оборудования на проектируемой подстанции. Для достижения данной цели необходимо закрепление теоретического материала и приобретение практических навыков по проектированию электрической части подстанции, расчету и выбору шин, трансформаторов, высоковольтных аппаратов, а также приобретение опыта в использовании справочной литературы, руководящих указаний и нормативных материалов.

1. Исходные данные

Проектирование подстанции 110/35/10 кВ
Параметры ПС № 2 (рис. 1).
1. Тип подстанции: тупиковая.
2. Величина тока КЗ на стороне ВН $I_{кз}$ =30 кА
3. R_c=0,03X_c
4. На стороне СН:
$P_{СН} = 21$ МВт; $cos\varphi = 0{,}94$. Количество отходящих линий – 6.
5. На стороне НН:
$P_{НН} = 12$ МВт; $cos\varphi = 0{,}8.$ Количество отходящих линий – 12.
6. Сечение провода (*Al*), мм^2 / Длина линии, км:
А–2': $\frac{240}{13}$; 2'–2: $\frac{150}{5}$; 2'–1: $\frac{185}{9}$.



II

Рис. 1. Скелетная схема.

2. Выбор компенсирующих устройств и трансформаторов

Определим мощность конденсаторных батарей по условию минимизации приведенных затрат на передачу реактивной мощности с использованием экономического значения $tg\varphi_Э$. Так как проектируется сеть 110/10кВ, то базовый экономический коэффициент реактивной мощности $tg\varphi_Э$ = 0,3.

$$Q_{КУ} = P_{НН}(tg\varphi_{НН} - tg\varphi_Э) = 12 \cdot (0{,}75 - 0{,}3) = 5{,}08 \text{МВар}.$$

Принимаем к установке 2×УКРМ-10-2550 У1.

Найдем реактивную мощность на НН с учетом КУ:

$$Q'_{НН} = P_{НН} \cdot tg\varphi_{НН} - Q_{КУ} = 12 \cdot 0,75 - 5,08 = 3,6 МВар.$$

Потребляемая мощность $S_н$ из системы, т.е. с учетом установки КУ:

$$P_Н = P_{СН} + P_{НН} = 21 + 12 = 33 МВт.$$

$$Q_Н = P_{СН} \cdot tg\varphi_{СН} + Q'_{НН} = 21 \cdot 0,36 + 3,552 = 9,5 МВар.$$

$$S_Н = \sqrt{P^2_Н + Q^2_Н} = \sqrt{33^2 + 9,5^2} = 34.83 МВА.$$

Расчетная мощность одного трансформатора:

$$S_{ТР} = \frac{S_Н}{1,1} = \frac{34.83}{1,1} = 31,6 МВА.$$

Выбираем 2×ТДТН-40000/110 У1

Каталожные данные трансформатора:

$U_{ВН}$=115 кВ, $U_{СН}$=38,5 кВ, $U_{НН}$=11 кВ;

$u_{кв-с}$=10,5%, $u_{кв-н}$=17%, $u_{кс-н}$=6%;

$R_{ТВ}$= $R_{ТС}$= $R_{ТН}$=0,8 Ом;

$X_{ТВ}$=35,5 $X_{ТС}$=22,3 $X_{ТН}$=0 Ом.

3. Расчет токов трехфазного короткого замыкания

На рис.2 представлена расчетная схема замещения

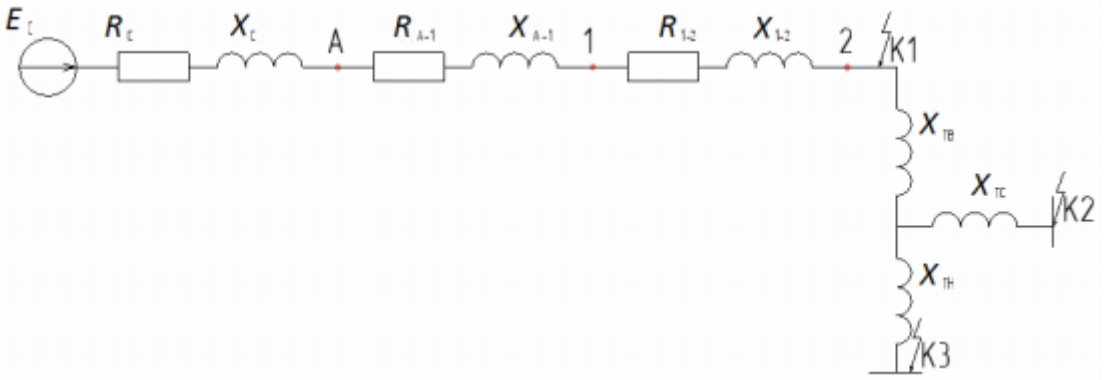


Рис.2. Схема замещения

Энергосистема:

$$Z_c = \frac{U_{ср,ВН}}{\sqrt{3} \cdot I_{кз}} = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 31} = 2,142 \text{ Ом.}$$

$$X_c = \frac{Z_c}{\sqrt{1,0009}} = \frac{2,14}{\sqrt{1,0009}} = 2,139 \text{ Ом.}$$

$$R_c = 0,03 \cdot X_c = 0,03 \cdot 2,139 = 0,064 \text{ Ом.}$$

Линия:

$$R_{ЛА-2'} = r_{0А-2'} \cdot L_{А-2'} = 0,118 \cdot 13 = 2,88 \text{ Ом.}$$

$X_{ЛА-2'} = x_{0A-2'} \cdot L_{A-2'} = 0{,}405 \cdot 13 = 9{,}095$ Ом.

$R_{Л2'-2} = r_{02'-2} \cdot L_{2'-2} = 0{,}118 \cdot 5 = 1{,}45$ Ом.

$X_{Л2'-2} = x_{02'-2} \cdot L_{2'-2} = 0{,}405 \cdot 5 = 3{,}326$ Ом.

$R_{Л1-2'} = r_{01-2'} \cdot L_{A1-2'} = 0{,}244 \cdot 9 = 1{,}851$ Ом.

$X_{Л1-2'} = x_{01-2'} \cdot L_{1-2'} = 0{,}427 \cdot 9 = 8{,}975$ Ом.

Трансформатор:

Определим ток короткого замыкания в точке К1:

$X_1 = X_{СИС} + X_{A-2'} + X_{2-2'} = 2{,}139 + 9{,}095 + 3{,}326 = 18{,}129$ Ом.

$R_1 = R_{СИС} + R_{A-2'} + R_{2-2'} = 0{,}064 + 2{,}88 + 1{,}45 = 4{,}753$ Ом.

$$Z_1 = \sqrt{R^2{}_1 + X^2{}_1} = \sqrt{18{,}129^2 + 4{,}753^2} = 18{,}852 \text{MBA}.$$

$$I_{ПО,ВН} = \frac{U_{ср,ВН}}{\sqrt{3} \cdot Z_1} = \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 18{,}852} = 3503{,}154 \text{ Ом}.$$

$$T_a = \frac{X_1}{\omega \cdot R_1} = \frac{18{,}129}{314 \cdot 4{,}784} = 0{,}0122 \text{ с}.$$

Определим ток короткого замыкания в точке К2:

$X_2 = X_1 + X_{ТВ} + X_{ТС} = 18{,}129 + 35{,}5 + 22{,}3 = 75{,}125$ Ом.

$R_2 = R_1 + R_{ТВ} + R_{ТС} = 4{,}753 + 0{,}8 + 0{,}8 = 6{,}274$ Ом.

$$Z_2 = \sqrt{R^2{}_2 + X^2{}_2} = \sqrt{76{,}125^2 + 6{,}274^2} = 76{,}395 \text{MBA}.$$

$$I'_{ПО,ВН} = \frac{U_{ср,ВН}}{\sqrt{3} \cdot Z_2} = \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 76{,}195} = 869{,}98 \text{ Ом}.$$

$$I_{ПО,ВН} = I'_{ПО,ВН} \cdot \frac{115}{38{,}5} = 869{,}98 \cdot \frac{115}{38{,}5} = 2598{,}642 \text{ Ом}.$$

$$T_a = \frac{X_2}{\omega \cdot R_2} = \frac{76{,}139}{314 \cdot 6{,}384} = 0{,}038 \text{ с}.$$

Определим ток короткого замыкания в точке К3:

$X_3 = X_1 + X_{ТВ} + X_{ТН} = 18{,}129 + 35{,}5 + 0 = 53{,}839$ Ом.

$R_3 = R_1 + R_{ТВ} + R_{ТН} = 4{,}784 + 0{,}8 + 0{,}8 = 6{,}384$ Ом.

$$Z_3 = \sqrt{R^2{}_3 + X^2{}_3} = \sqrt{53{,}839^2 + 6{,}384^2} = 54{,}195 \text{MBA}.$$

$$I'_{ПО,ВН} = \frac{U_{ср,ВН}}{\sqrt{3} \cdot Z_3} = \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 54{,}216} = 1224{,}644 \text{ Ом}.$$

$$I_{ПО,ВН} = I'_{ПО,ВН} \cdot \frac{115}{11} = 1224{,}644 \cdot \frac{115}{11} = 12803{,}089 \text{ Ом}.$$

$$T_a = \frac{X_3}{\omega \cdot R_3} = \frac{53{,}839}{314 \cdot 6{,}384} = 0{,}0269 \text{ с}.$$

Таблица 1. Сводная таблица токов КЗ

Сторона	$U_{\text{ном}}$, кВ	$U_{\text{ср}}$, кВ	$I_{\text{ПО}}$, кА
ВН	110	115	3503,154
СН	35	38,5	2598,642
НН	10	11	12803,093

4. Выбор оборудования на стороне ВН

Выбор выключателей и разъединителей на стороне ВН.

В качестве РУ 110кВ применяем схему 4Н.

Для выбора выключателей и разъединителей на стороне ВН расчетной точкой является точка К1 и ток $I_{\text{ПО}} = 3503{,}154$ А.

Выбор выключателя производится по следующим параметрам:

1. По напряжению установки: $U_{\text{уст}} \le U_{\text{ном}}$.

2. По длительному току: $I_{max} \le I_{\text{ном}}$.

Напряжение в цепи выключателя:

$U_{\text{уст}} = 110кВ = U_{\text{ном}} = 110кВ$.

Максимальный ток в цепи выключателя:

$$I_{max} = \frac{S_{max,\text{раб}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ВН}}} = \frac{40 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 110} = 209{,}946 \text{ А},$$

где $S_{max,\text{раб}}$ - мощность трансформатора.

По каталогу выбираем вакуумный выключатель типа ВРС-110III-31,5/2500УХЛ1.

$I_{max} = 209{,}946\text{А} \le I_{\text{ном}} = 2500\text{А}$.

Проверим выбранный выключатель по следующим условиям:

1. Возможность отключения апериодической составляющей тока К.З.:

$i_{a.\tau} \le i_{a.\text{ном}}$,

где $i_{a.\text{ном}}$ – номинальное допускаемое значение апериодической составляющей в отключаемом токе для времени τ; $i_{a,\tau}$ – апериодическая составляющая тока К.З. в момент расхождения контактов.

Апериодическая составляющая тока КЗ.:

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ПО}} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 3503{,}154 \cdot e^{\frac{-0{,}055}{0{,}0122}} = 54{,}589 \text{ А},$$

$$\tau = t_{\text{з.мин}} + t_{\text{с.в}} = 0{,}01 + 0{,}045 = 0{,}055 \text{ с},$$

где T_a – постоянная времени цепи КЗ, учитывает влияние апериодической составляющей в токе КЗ; $I_{\text{П0}}$ – начальное значение периодической составляющей тока КЗ в цепи выключателя; τ – наименьшее время от начала КЗ до момента расхождения дугогасительных контактов, $t_{\text{з.мин}}$ = 0,01 с –

минимальное время действия релейной защиты; $t_{\text{с.в}}$ – собственное время отключения выключателя.

Номинальное допустимое значение апериодической составляющей выключаемого тока:

$$i_{a.\text{ном}} = (\sqrt{2} \cdot \beta_{\text{ном}} \cdot I_{\text{откл.ном}})/100 = (\sqrt{2} \cdot 30 \cdot 31{,}5)/100 = 13{,}36 \text{ кА},$$

где $\beta_{\text{ном}}$ – нормированное процентное содержание апериодической составляющей в отключающем токе (по каталогу или рис.3); $I_{\text{откл.ном}}$ – номинальный ток отключения (по каталогу).

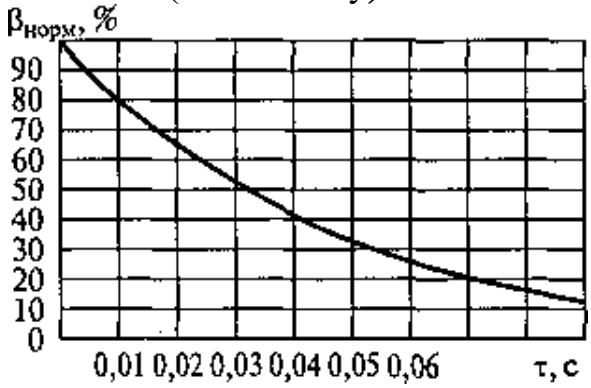


Рис. 3 Нормированное содержание апериодической составляющей.

$i_{a.\tau} = 54{,}589A \le i_{a.\text{ном}} = 13{,}36кA$ - условие выполняется.

2. На электродинамическую стойкость:

$i_{\text{уд}} \le i_{\text{дин}}$, где $i_{\text{уд}}$ – ударный ток КЗ в цепи выключателя; $i_{\text{дин}}$ – наибольший пик тока включения (ток электродинамической стойкости) по каталогу.

Ударный ток КЗ:

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ПО}} \cdot \left(1 + e^{-0{,}01/T_a}\right) = \sqrt{2} \cdot 3503{,}154 \cdot \left(1 + e^{-0{,}01/0{,}0122}\right) = 7136{,}914 \text{ А}.$$

$i_{\text{уд}} = 7136{,}914 \text{ А} \le i_{\text{дин}} = 81\text{кА}$ – условие выполняется.

3. На термическую стойкость:

$$I_{\text{Т}}^2 \cdot t_{\text{Т}} \ge B_к,$$

где $I_{\text{Т}}$ – ток термической стойкости по каталогу; $t_{\text{Т}}$ – длительность протекания тока термической стойкости по каталогу, с; $B_к$ – тепловой импульс тока КЗ (интеграл Джоуля) по расчету.

Тепловой импульс тока КЗ (расчетный):

$$B_К = I_{\text{П0}}^2 \cdot (t_{\text{з.мин}} + t_{\text{выкл}} + T_a + 3 \cdot \Delta t) = 3503{,}154^2 \cdot (0{,}01 + 0{,}065 + 0{,}0122 +$$
$$+ 3 \cdot 0{,}5) = 19{,}478 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}.$$

где $t_{\text{выкл}}$ – полное время отключения выключателя (по каталогу $t_{\text{выкл}} = 0{,}065$ с); Δt – время ступени селективности (избирательности), $\Delta t = 0{,}5$ с, (на стороне 110 – 220 кВ принимают $3\Delta t$).

$I_t^2 \cdot t_t = 31{,}5^2 \cdot 3 = 2977 \cdot 10^6\ \text{А}^2 \cdot \text{с}$.

$I_{\text{Т}}^2 \cdot t_{\text{Т}} = 2977 \cdot 10^6\ \text{А}^2 \cdot \text{с} \geq B_к = 19{,}478 \cdot 10^6\ \text{А}^2 \cdot \text{с}$ – условие выполняется.

Выбор разъединителей производится по следующим параметрам:

1. По напряжению установки: $U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}}$.

$U_{\text{уст}} = 110$ кВ $= U_{\text{ном}} = 110$ кВ.

2. По длительному току: $I_{max} \leq I_{\text{ном}}$.

$I_{max} = 131{,}216\text{А} \leq I_{\text{ном}} = 1000\text{А}$.

В качестве разъединителей наружной установки выбираем разъединители типа: РДЗ-1-110/1000 УХЛ1.

Проверка разъединителей производится по следующим условиям:

1. На электродинамическую стойкость:

$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{дин}}$,

Ударный ток КЗ:

$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ПО}} \cdot \left(1 + e^{-0{,}01/T_a}\right) = \sqrt{2} \cdot 3503{,}154 \cdot \left(1 + e^{-0{,}01/0{,}0122}\right) = 7136{,}914$ А.

$i_{\text{уд}} = 7136{,}914\,\text{А} \leq i_{\text{дин}} = 80\text{кА}$ – условие выполняется.

2. На термическую стойкость:

$I_{\text{Т}}^2 \cdot t_{\text{Т}} \geq B_к$,

Тепловой импульс тока КЗ (расчетный):

$B_К = I_{\text{П0}}^2 \cdot (t_{\text{РЗА}} + t_{\text{выкл}} + T_a + 3 \cdot \Delta t) = 3503{,}154^2 \cdot (0{,}01 + 0{,}0122 + 0{,}065 +$

$+ 3 \cdot 0{,}5) = 19{,}478 \cdot 10^6\ \text{А}^2 \cdot \text{с}$.

$I_t^2 \cdot t_t = 31{,}5^2 \cdot 3 = 2977 \cdot 10^6\ \text{А}^2 \cdot \text{с}$.

$I_{\text{Т}}^2 \cdot t_{\text{Т}} = 2977 \cdot 10^6\ \text{А}^2 \cdot \text{с} \geq B_к = 19{,}478 \cdot 10^6\ \text{А}^2 \cdot \text{с}$ – условие выполняется.

Выбор трансформаторов тока на стороне ВН и контрольно-измерительных приборов.

На сторону ВН устанавливаем два трансформатора тока: наружной установки и встроенный в силовой трансформатор.

Трансформаторы тока выбираются:

1. По напряжению установки:

$U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}}$.

2. По длительному току:

$I_{max,\text{ТТ}} \leq I_{\text{ном}}$,

$$I_{max,\text{ТТ}} = \frac{S_{\text{Н}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ВН}}},$$

где $S_{\text{Н}}$ - потребляемая мощность из системы, т.е. с учетом установки КУ.

Выбранные трансформаторы проверяются по следующим условиям:

1. На электродинамическую стойкость: $i_{\text{уд}} \le i_{\text{дин}}$.

2. На термическую стойкость: $B_K \le I_t^2 \cdot t_t$.

3. На вторичную нагрузку: $z_2 \le z_{2\text{ном}}$.

В качестве трансформатора тока наружной установки был выбран ТГМ-110 УХЛ1, с номинальным током $I_{\text{ном}}$ = 200 А.

Таблица 2

Расчетные данные	Каталожные данные
$U_{\text{уст}} = 110$ кВ	$U_{\text{ном}} = 110$ кВ
$I_{max,\text{ТТ}} = \frac{31{,}46 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 110} = 165{,}122$ А	$I_{\text{ном}} = 200$ А
$i_{\text{уд}} = 7136{,}914$ А	$i_{\text{дин}} = 60$ кА
$B_к = 19{,}478 \cdot 10^6$ А$^2 \cdot$с	$I_t^2 \cdot t_t = 24^2 \cdot 3 = 1728 \cdot 10^6$ А$^2 \cdot$с

В качестве трансформатора тока, встроенного в силовой трансформатор, выбран трансформатор тока типа ТВТ-110-I -200/5:

Таблица 3

Расчетные данные	Каталожные данные
$U_{\text{уст}} = 110$ кВ	$U_{\text{ном}} = 110$ кВ
$I_{max,\text{ТТ}} = \frac{31{,}46 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 110} = 165{,}122$ А	$I_{\text{ном}} = 200$ А
$B_к = 19{,}478 \cdot 10^6$ А$^2 \cdot$с	$I_t^2 \cdot t_t = (25 \cdot 200)^2 \cdot 3 = 75 \cdot 10^6$ А$^2 \cdot$с

Таблица 4

Прибор	Тип	Нагрузка фаз, ВА		
		А	В	С
Амперметр	Э-335.1-1	0,5	-	-
Ваттметр	Д-365	0,5	-	0,5
Варметр	Д-365	0,5	-	0,5
Счетчик активной и реактивной энергии	Меркурий230ART-03 P(Q)R(C)SIDN	0,1	-	0,1
Итого		1,6	-	1,1

Предварительно принимаем кабель АКВВГ с алюминиевыми жилами сечением 4 мм^2.

Вторичная нагрузка r_2 включает сопротивления приборов $r_{\text{приб}}$, соединительных проводов $r_{\text{пр}}$ и переходного сопротивления контактов $r_{\text{к}}$:

$$r_2 = r_{\text{приб}} + r_{\text{пр}} + r_{\text{к}}.$$

Сопротивление приборов определяется по выражению

$$r_{\text{приб}} = \frac{S_{\text{приб}}}{I_2{}^2} = \frac{1{,}6}{5^2} = 0{,}064\ Ом,$$

где $S_{\text{приб}}$ – мощность, потребляемая приборами; I_2 – вторичный номинальный ток прибора.

Сопротивление контактов принимается 0,05 Ом при двух-трех приборах и 0,1 Ом при большем числе приборов. Принимаем $r_{\text{к}} = 0{,}1$Ом.

Чтобы трансформатор тока работал в выбранном классе точности, необходимо выдержать условие:

$$r_{\text{приб}} + r_{\text{пр}} + r_{\text{к}} \le z_{2\,\text{ном}}.$$

Откуда,

$$r_{\text{пр}} \le z_{2\,\text{ном}} - r_{\text{приб}} - r_{\text{к}}.$$

Найдем $z_{2\,\text{ном}}$:

$$z_{2\,\text{ном}} = \frac{S_{\text{вт}}}{I_2{}^2} = \frac{20}{5^2} = 0{,}8\ \text{Ом},$$

где $S_{\text{вт}}$ – вторичная нагрузка трансформатора тока (по каталогу).

Сопротивление соединительных проводов:

$$r_{\text{пр}} = z_{2\,\text{ном}} - r_{\text{пр}} - r_{\text{к}} = 0{,}8 - 0{,}064 - 0{,}1 = 0{,}636\ \text{Ом}.$$

Зная $r_{\text{пр}}$, можно определить сечение соединительных проводов

$$q = \frac{\rho l_{\text{расч}}}{r_{\text{пр}}} = \frac{0{,}0283 \cdot 80}{0{,}636} = 3{,}56\ \text{мм}^2.$$

где ρ – удельное сопротивление материала провода. Провода с медными жилами $\left(\rho = 0{,}0175\,\frac{\text{Ом}\cdot\text{мм}^2}{\text{м}}\right)$ применяются во вторичных цепях основного и вспомогательного оборудования мощных электростанций с агрегатами 100 МВт и более, а также на подстанциях с высшим напряжением 220 кВ и выше. В остальных случаях во вторичных цепях применяются провода с алюминиевыми жилами $\left(\rho = 0{,}0283\,\frac{\text{Ом}\cdot\text{мм}^2}{\text{м}}\right)$; $l_{\text{расч}}$ – расчетная длина,

зависящая от схемы соединения трансформаторов тока (для подстанций длины снижаются на 15 – 20 %).

По условию прочности сечение не должно быть меньше для токовых цепей - 2,5 мм^2 для меди и 4 мм^2 для алюминия (ПУЭ, п. 3.4.4). Сечение больше 6 мм^2 обычно не применяется.

Кабель КВВГ с алюминиевыми жилами сечением 4 мм^2 имеет следующие параметры:

$q_{\text{ном}} = 4\,\text{мм}^2$ $r_0 = 7{,}9\,\text{Ом/км}$.

Определим сопротивление привода:

$r_{\text{пр}} = r_0 \cdot l_{\text{расч}} = 0{,}0079 \cdot 80 = 0{,}632\ \text{Ом}$.

Найдем z_2 :

$z_2 = 0{,}632 + 0{,}064 + 0{,}1 = 0{,}796\,\text{Ом}$,

$z_2 = 0{,}796\ \text{Ом} \le z_{2,\text{ном}} = 0{,}8\ \text{Ом}$ – условие выполняется.

Принимаем к установке контрольный кабель КВВГ с алюминиевыми жилами сечением жил 4 мм^2.

Выбор трансформаторов напряжения на стороне ВН и контрольно - измерительных приборов.

Трансформаторы напряжения выбираются:

1. по напряжению установки: $U_{\text{уст}} \le U_{\text{ном}}$.

2. по вторичной нагрузке: $S_{2\Sigma} \le S_{\text{ном}}$.

Нагрузка всех измерительных приборов, присоединенных к трансформатору напряжения:

Таблица 5

Прибор	Тип	S одной обмотки, ВА	Число обмоток	Число приборов	Потребляемая мощность S, ВА
Вольтметр	Э-350	2	1	2	4
Вольтметр регистрир.	Н-394	10	1	1	10
Ваттметр	Д-365	2	2	3	12
Варметр	Д-365	2	2	3	12
Счетчик активной и реактивной энергии	Меркурий230AR Т-03 P(Q)R(C)SIDN	-	-	-	7,5

Фиксатор импульсного действия	ФИП-В	3	1	3	9
Итого					54,5

Выбираем ТН НАМИ 110 УХЛ1, классом точности 0,5, с номинальном вторичной нагрузкой $S_{2\,\text{ном}} = 250\,\text{ВА}$.

Мощность нагрузки на вторичной обмотке трансформатора напряжения:

$S_{2\Sigma} = 55\,\text{ВА} < 250\,\text{ВА}$ - условие выполняется.

Выбор ОПН:

- ограничитель перенапряжения: ОПН–П1–110/73/10/2УХЛ1;
- ограничитель перенапряжения в нейтрали трансформатора: ОПНН-П1-110/60/10/2УХЛ1.

Выбор ЗОН:

- заземлитель нейтрали трансформатора: ЗОН–110М–IУХЛ1.

Выбор оборудования для ВЧ связи:

- высокочастотный заградитель: ВЗ-400-0,1 УХЛ1;
- фильтр присоединения: ФПМ-Рс-2200/110-1000 У1;
- конденсатор связи: П-110/√3-6,4 У1.

Выбор изоляторов:

- изоляторы наружной установки 110 кВ опорного типа ОСК10–110–А–2УХЛ1;
- изоляторы наружной установки 110 кВ подвесного типа ЛК 70/110-3 УХЛ1.

Выбор жестких шин на стороне ВН.

Жесткие шины на стороне ВН устанавливаем от ВЧ-заградителя до измерительного трансформатора тока.

Предварительно (по каталогу) применяем жесткую ошиновку СЭЩ сечением трубы 80×4мм из алюминиевого сплава 1915.

1. Механический расчет однополосных шин.

Наибольшее удельное усилие при трехфазном КЗ:

$$f = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i_{\text{уд}}^2}{a} = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot \frac{7136{,}914^2}{1} = 8{,}822\ \text{Н/м},$$

где a – расстояние между фазами, м. (табл. 4.2.5 ПУЭ).

Изгибающий момент:

$$M_{max} = \frac{f \cdot l^2}{10} = \frac{8{,}822 \cdot 9^2}{10} = 71{,}458 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где l – длина пролета между опорными изоляторами шинной конструкции, м (принимают 2-10 м.).

Наружный и внутренний диаметры выбранной ошиновки сечением трубы 80×4мм:

$$D_{\text{нар}} = 80\text{мм}, d_{\text{вн}} = 72\text{мм}.$$

Найдем сечение q выбранной шины:

$$q = \pi \cdot \left(R_{\text{нар}}^2 - R_{\text{вн}}^2\right) = 3{,}14 \cdot \left(40^2 - 36^2\right) = 954{,}56 \text{ мм}^2.$$

Момент сопротивления шины относительно оси, перпендикулярной действию усилия:

$$W = \frac{\pi \cdot \left(D^4 - d^4\right)}{32 \cdot D} = \frac{3{,}14 \cdot \left(8^4 - 7{,}2^4\right)}{32 \cdot 8} = 17{,}278 \text{ см}.$$

Напряжение в материале шины, возникающее при воздействии изгибающего момента:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W} = \frac{71{,}458}{17{,}278} = 4{,}136 \text{ МПа}.$$

$\sigma_{max} \le \sigma_{\text{доп}}$ – условие механической прочности.

$\sigma_{\text{доп}} = 247$ МПа .

$247 \text{ МПа} \ge 4{,}136 \text{ МПа}$ – условие выполняется.

2. Проверка по нагреву (допустимому току).

Условие проверки:

$I_{\text{доп}} \ge I_{max}$,

где $I_{\text{доп}}$ – допустимый ток на шины выбранного сечения с учетом поправки при температуре воздуха, отличной от принятой в таблицах ($\vartheta_{\text{о.ном}} = 25\ ^\circ C$).

$$I_{max} = \frac{S_{\text{Н}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ВН}}} = \frac{31{,}46 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 110} = 165{,}122 \text{ А},$$

где $S_{\text{Н}}$ - потребляемая мощность из системы, т.е. с учетом установки КУ.

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{доп.ном}} \cdot \sqrt{\frac{\vartheta_{\text{доп}} - \vartheta_0}{\vartheta_{\text{доп}} - \vartheta_{0.\text{доп}}}},$$

где $I_{\text{доп.ном}}$ – допустимый ток по таблицам ПУЭ при температуре воздуха $\vartheta_{\text{о.ном}} = 25\ ^\circ\text{C}$; ϑ_0 – действительная температура воздуха, принимаем равным $\vartheta_0 = 40^\circ\text{C}$.

По табл. 1.3.30 ПУЭ (для алюминиевых труб) для выбранной ошиновки сечением трубы 80×4мм: $I_{\text{доп.ном}} = 2035$ А .

Для неизолированных проводов и окрашенных шин принято:

$\vartheta_{\text{доп}} = 70°\text{C}, \vartheta_{0.\text{д.д}} = 25°\text{C}.$

Допустимый ток:

$$I_{\text{доп}} = 2035 \cdot \sqrt{\frac{70-40}{70-25}} = 1662{,}6 \text{ А};$$

$1662{,}6 \text{ А} \geq 165{,}122 \text{А}$ – условие выполняется.

3. Проверка шин на термическую стойкость.

Условие проверки:

$q \geq q_{min}$,

где $q_{min} = \sqrt{B_K} / C_T$ – минимальное сечение проводника, которое при заданном токе КЗ обуславливает нагрев проводника до кратковременной допустимой температуры; q – выбранное сечение шины; B_K – интеграл Джоуля по расчету; C_T – функция, значения которой приведены при наихудшей начальной температуре ($120°C$).

$$q_{min} = \frac{\sqrt{B_K}}{C_T} = \frac{\sqrt{19{,}247 \cdot 10^6}}{51} = 86{,}537 \text{ мм}^2,$$

$q_{min} = 86{,}537 мм^2 \leq q = 954{,}56 \text{ мм}^2$ – условие выполняется.

4. Проверка на электродинамическую стойкость с учетом механических колебаний.

Условие проверки:

$$J = \frac{\pi \cdot \left(D^4 - d^4\right)}{64} = \frac{3{,}14 \cdot \left(8^4 - 7{,}2^4\right)}{64} = 69.11 \text{ см}^4,$$

где J – момент инерции поперечного сечения шины относительно оси, перпендикулярной направлению изгибающей силы, см^4.

Частота собственных колебаний алюминиевых шин:

$$f_0 = \frac{173{,}2}{l^2} \sqrt{\frac{J}{q}} = \frac{173{,}2}{9^2} \sqrt{\frac{69{,}11}{9{,}5456}} = 5{,}753 \text{ Гц},$$

где l – длина пролета между изоляторами, м; q – выбранное сечение шины, см^2.

$5{,}753 < 30 \text{ Гц}$ – механический резонанс не возникает, условие выполняется.

Все условия выполняются. Окончательно выбираем жесткую ошиновку производства СЭЩ сечением трубы 80×4 мм из алюминиевого сплава 1915.

Выбор гибких шин на ВН.

Гибкие шины на стороне ВН устанавливаем от измерительного трансформатора тока до силового трансформатора.

1. Проверка по экономической плотности тока.

$$I_{max} = \frac{S_{\text{Н}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ВН}}} = \frac{31{,}46 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 110} = 165{,}122 \text{ А},$$

где $S_{\text{Н}}$ - потребляемая мощность из системы, т.е. с учетом установки КУ.

$$q_{\text{э}} = \frac{I_{max}}{j_{\text{э}}} = \frac{165{,}122}{1{,}1} = 150{,}111 \text{ мм}^2,$$

где $j_{\text{Э}}$ – экономическая плотность тока, А/мм^2 (табл. 1.3.36 ПУЭ).

Применяем провод АС-150/24.

2. Проверка сечения по допустимому току.

Условие проверки:

$I_{\text{доп}} \geq I_{max}$,

где $I_{\text{доп}}$ – допустимый ток на шины выбранного сечения с учетом поправки при температуре воздуха, отличной от принятой в таблицах ($\vartheta_{\text{о.ном}} = 25$ °С).

$$I_{max} = \frac{S_{\text{Н}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ВН}}} = \frac{31{,}46 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 110} = 165{,}122 \text{ А},$$

где $S_{\text{Н}}$ - потребляемая мощность из системы, т.е. с учетом установки КУ.

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{доп.ном}} \cdot \sqrt{\frac{\vartheta_{\text{доп}} - \vartheta_0}{\vartheta_{\text{доп}} - \vartheta_{0.\text{доп}}}},$$

где $I_{\text{доп.ном}}$ – допустимый ток по табл. 1.3.29 ПУЭ при температуре воздуха $\vartheta_{\text{о.ном}} = 25$ °С; ϑ_0 – действительная температура воздуха, принимаем равным $\vartheta_0 = 40°C$.

Для АС-150/24 по табл. 1.3.29 ПУЭ: $I_{\text{доп.ном}} = 450$ А.

Для неизолированных проводов и окрашенных шин принято:

$\vartheta_{\text{доп}} = 70°\text{C}, \vartheta_{0.\text{доп}} = 25°\text{C}.$

Допустимый ток:

$$I_{\text{доп}} = 450 \cdot \sqrt{\frac{70 - 40}{70 - 25}} = 367{,}423 \text{ А};$$

$367{,}423 \text{ А} \geq 165{,}122 \text{ А}$ – условие выполняется.

3. Проверка шин на термическую стойкость.

Условие проверки:

$q \geq q_{min}$,

где $q_{min} = \sqrt{B_K} / C_T$ – минимальное сечение проводника, которое при заданном токе КЗ обуславливает нагрев проводника до кратковременной допустимой температуры; q – выбранное сечение шины; B_K – интеграл Джоуля по расчету; C_T – функция, значения которой приведены при допустимой температуре нагрева проводов при КЗ $160°C$.

$$q_{min} = \frac{\sqrt{B_K}}{C_T} = \frac{\sqrt{19{,}478 \cdot 10^6}}{76} = 58{,}071\ \text{мм}^2;$$

$q_{min} = 58{,}071\ \text{мм}^2 \le q = 150\ \text{мм}^2$ – условие выполняется.

4. На электродинамическое действие тока КЗ проверяют гибкие шины РУ при $I_{КЗ} \geq 20$кА. Так как ток $I_{П0}$ в точке К1 меньше 20кА, то проверку не делаем.

5. Проверка по условиям короны.

Условие отсутствия короны:

$1{,}07 \cdot E \le 0{,}9 \cdot E_0$.

Разряд в виде короны возникает при максимальном значении начальной критической напряженности электрического поля:

$$E_0 = 30{,}3 \cdot m \cdot \left(1 + \frac{0{,}299}{\sqrt{r_0}}\right) = 30{,}3 \cdot 0{,}82 \cdot \left(1 + \frac{0{,}299}{\sqrt{0{,}855}}\right) = 32{,}88\ \text{кВ/см},$$

где m – коэффициент, учитывающий шероховатость поверхности провода (для многопроволочных проводов m = 0,82); r_0 – радиус провода по ГОСТ 839-80 «Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи» (приложение 1, табл. 4), см. Для АС-150/24 $r_0 = 0{,}855$ см.

Напряженность электрического поля около поверхности нерасщепленного провода:

$$E = \frac{0{,}354 \cdot U}{r_0 \cdot \lg \frac{D_{ср}}{r_0}} = \frac{0{,}354 \cdot 110}{0{,}855 \cdot \lg \frac{1{,}26 \cdot 100}{0{,}855}} = 21{,}003\ \text{кВ/см},$$

где U – линейное напряжение, кВ; $D_{\text{ср}}$ – среднее геометрическое расстояние между проводами фаз, см.

При горизонтальном расположении фаз $D_{\text{ср}} = 1{,}26D$, где D – расстояние между соседними фазами по табл. 4.2.5 ПУЭ, см.

Проверяем условие:

$1{,}07 \cdot 21{,}003 \le 0{,}9 \cdot 32{,}88$

$29{,}592 \le 22{,}473$ – условие выполняется, провода не будут коронировать.

Все условия выполняются. Окончательно принимаем к установке гибкие шины из сталеалюминевых проводов АС 150/24.

5. Выбор оборудования на стороне СН

На стороне 35 кВ подстанции принимаем к установке комплектное распределительное устройство КРУ 35 кВ серии К-405.

Выбор выключателя на стороне СН.

Для выбора выключателя на стороне СН расчетной точкой является точка К2 и ток $I_{\text{ПО}} = 2598{,}642$ А.

Выбор выключателя производится по следующим параметрам:

1. По напряжению установки: $U_{\text{уст}} \le U_{\text{ном}}$.

2. По длительному току: $I_{max} \le I_{\text{ном}}$.

Выключатель ячейки ввода.

Максимальный ток в цепи выключателя:

$$I_{max} = \frac{S_{max}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{СН}}} = \frac{40 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 35} = 659{,}829 \text{ А},$$

где S_{max} - мощность трансформатора.

По каталогу выбираем ВБ-35-31,5/1250У3 на номинальный ток 1250А.

Напряжение в цепи выключателя:

$U_{\text{уст}} = 35$ кВ $= U_{\text{ном}} = 35$ кВ.

$I_{max} = 659{,}829\text{А} \le I_{\text{ном}} = 1250\text{А}.$

Проверим выбранный выключатель по следующим условиям:

1.Возможность отключения апериодической составляющей тока к.з.:

$i_{a.\tau} \le i_{a.\text{ном}}$,

где $i_{a.\text{ном}}$ – номинальное допускаемое значение апериодической составляющей в отключаемом токе для времени τ; $i_{a,\tau}$ – апериодическая составляющая тока КЗ в момент расхождения контактов.

Апериодическая составляющая тока КЗ:

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ПО}} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 2598{,}642 \cdot e^{\frac{-0{,}05}{0{,}0269}} = 572{,}826 \text{ А},$$

$$\tau = t_{\text{з.мин}} + t_{\text{с.в}} = 0{,}01 + 0{,}04 = 0{,}05 \text{ с},$$

где T_a – постоянная времени цепи КЗ, учитывает влияние апериодической составляющей в токе КЗ; $I_{\text{П0}}$ – начальное значение периодической составляющей тока КЗ в цепи выключателя; τ – наименьшее время от начала КЗ до момента расхождения дугогасительных контактов, $t_{\text{з.мин}}$ = 0,01 с – минимальное время действия релейной защиты; $t_{\text{с.в}}$ – собственное время отключения выключателя.

Номинальное допустимое значение апериодической составляющей выключаемого тока:

$$i_{a.\text{ном}} = (\sqrt{2} \cdot \beta_{\text{ном}} \cdot I_{\text{откл.ном}})/100 = (\sqrt{2} \cdot 31{,}5 \cdot 32)/100 = 14{,}255 \text{ кА},$$

где $\beta_{\text{ном}}$ – нормированное процентное содержание апериодической составляющей в отключающем токе (по каталогу или рис.3); $I_{\text{откл.ном}}$ – номинальный ток отключения (по каталогу).

$i_{a.\tau} = 0{,}573\text{кА} \le i_{a.\text{ном}} = 14{,}255\text{кА}$ – условие выполняется.

2.На электродинамическую стойкость:

$i_{\text{уд}} \le i_{\text{дин}}$,

где $i_{\text{уд}}$ – ударный ток КЗ в цепи выключателя; $i_{\text{дин}}$ – наибольший пик тока включения (ток электродинамической стойкости) по каталогу.

Ударный ток КЗ:

$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ПО}} \cdot \left(1 + e^{-0,01/T_a}\right) = \sqrt{2} \cdot 2598,642 \cdot \left(1 + e^{-0,01/0,0269}\right) = 6208,138$ кА,

$i_{\text{уд}} = 6,208\text{кА} \le i_{\text{дин}} = 80,3\text{кА}$ – условие выполняется.

3.На термическую стойкость:

$I_T^2 \cdot t_T \ge B_к$,

где I_T – ток термической стойкости по каталогу; t_T – длительность протекания тока термической стойкости по каталогу, с; $B_к$ – тепловой импульс тока КЗ (интеграл Джоуля) по расчету.

Тепловой импульс тока КЗ (расчетный):

$B_K = I_{\text{П0}}^2 \cdot (t_{\text{РЗА}} + t_{\text{выкл}} + T_a + 2 \cdot \Delta t) = 2598,642^2 \cdot (0,01 + 0,06 + 0,0269 + 2 \cdot 0,5) =$

$= 7,407 \cdot 10^6 \text{А}^2 \cdot \text{с}$,

где $t_{\text{выкл}}$ – полное время отключения выключателя (по каталогу); Δt – время ступени селективности (избирательности), $\Delta t = (0,3$ - $0,5$ и т.д.) с, (для выключателя ячейки ввода принимают $2\Delta t$).

$I_t^2 \cdot t_t = 31,5^2 \cdot 3 = 2976,75 \cdot 10^6 \text{А}^2 \cdot \text{с}$,

$I_T^2 \cdot t_T = 2976,75 \cdot 10^6 \text{А}^2 \cdot \text{с} \ge B_к = 7,407 \cdot 10^6 \text{А}^2 \cdot \text{с}$ – условие выполняется.

Секционный выключатель.

Максимальный ток в цепи выключателя:

$$I_{MAX,\text{раб}} = \frac{S_{max,\text{раб}}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{СН}}} = \frac{40 \cdot 10^3}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 35} = 329,914A,$$

где $S_{max,\text{раб}}$ – мощность трансформатора.

По каталогу выбираем ВБ-35-25/630У3 на номинальный ток 630А.

Напряжение в цепи выключателя:

$U_{\text{уст}} = 35кВ = U_{\text{ном}} = 35$ кВ.

$I_{\text{max}} = 329,914 \le I_{\text{ном}} = 630$А.

Проверим выбранный выключатель по следующим условиям:

1.Возможность отключения апериодической составляющей тока к.з.:

$i_{a.\tau} \le i_{a.\text{ном}}$,

где $i_{a.\text{ном}}$ – номинальное допускаемое значение апериодической составляющей в отключаемом токе для времени τ; $i_{a,\tau}$ – апериодическая составляющая тока КЗ в момент расхождения контактов.

Апериодическая составляющая тока КЗ:

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{П0}} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 2598{,}642 \cdot e^{\frac{-0{,}05}{0{,}0269}} = 572{,}826 \text{ А},$$

$$\tau = t_{\text{з.мин}} + t_{\text{с.в}} = 0{,}01 + 0{,}04 = 0{,}05 \text{ с},$$

где T_a – постоянная времени цепи КЗ, учитывает влияние апериодической составляющей в токе КЗ; $I_{\text{П}0}$ – начальное значение периодической составляющей тока КЗ в цепи выключателя; τ – наименьшее время от начала КЗ до момента расхождения дугогасительных контактов, $t_{\text{з.мин}}$ = 0,01 с – минимальное время действия релейной защиты; $t_{\text{с.в}}$ – собственное время отключения выключателя.

Номинальное допустимое значение апериодической составляющей выключаемого тока:

$$i_{a.\text{ном}} = (\sqrt{2} \cdot \beta_{\text{ном}} \cdot I_{\text{откл.ном}})/100 = (\sqrt{2} \cdot 32 \cdot 25)/100 = 11{,}314 \text{ кА},$$

где $\beta_{\text{ном}}$ – нормированное процентное содержание апериодической составляющей в отключающем токе (по каталогу или рис.3); $I_{\text{откл.ном}}$ – номинальный ток отключения (по каталогу).

$i_{a.\tau} = 0{,}573\text{кА} \le i_{a.\text{ном}} = 11{,}314\text{кА}$ – условие выполняется.

2.На электродинамическую стойкость:

$$i_{\text{уд}} \le i_{\text{дин}},$$

где $i_{\text{уд}}$ – ударный ток КЗ в цепи выключателя; $i_{\text{дин}}$ – наибольший пик тока включения (ток электродинамической стойкости) по каталогу.

Ударный ток КЗ:

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ПО}} \cdot \left(1 + e^{-0{,}01/T_a}\right) = \sqrt{2} \cdot 2598{,}642 \cdot \left(1 + e^{-0{,}01/0{,}0269}\right) = 6208{,}138\text{кА},$$

$i_{\text{уд}} = 6{,}208\text{кА} \le i_{\text{дин}} = 63\text{кА}$ - условие выполняется.

3.На термическую стойкость:

$$I_T^2 \cdot t_T \ge B_к,$$

где I_T – ток термической стойкости по каталогу; t_T – длительность протекания тока термической стойкости по каталогу, с; $B_к$ – тепловой импульс тока КЗ (интеграл Джоуля) по расчету.

Тепловой импульс тока КЗ (расчетный):

$$B_K = I_{\text{П0}}^2 \cdot (t_{\text{РЗА}} + t_{\text{выкл}} + T_a + \Delta t) = 2598{,}642^2 \cdot (0{,}01 + 0{,}06 + 0{,}0269 + 0{,}5) =$$

$$= 4{,}031 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с},$$

где $t_{\text{выкл}}$ – полное время отключения выключателя (по каталогу $t_{\text{выкл}}$ = 0,06 с); Δt – время ступени селективности (избирательности), Δt =0,5 с, (для секционного выключателя принимают Δt).

$I_t^2 \cdot t_t = 25^2 \cdot 3 = 1875 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$.

$I_T^2 \cdot t_T = 1875 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с} \ge B_к = 4{,}031 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$ – условие выполняется.

Выключатель отходящих линий.

Максимальный ток в цепи выключателя:

$$I_{MAX,\text{раб}} = \frac{\sqrt{P_{\text{СН}}^2 + Q_{\text{СН}}^2}}{N_{\text{отх}} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{СН}}} = \frac{\sqrt{18^2 + 5{,}94^2} \cdot 10^3}{6 \cdot \sqrt{3} \cdot 35} = 51{,}962 \text{ А}$$

где $P_{\text{СН}}$ – активная мощность на СН; $Q_{\text{СН}}$ – полная реактивная мощность на СН, $Q_{\text{СН}} = P_{\text{СН}} \cdot tg\varphi_{\text{СН}}$; $N_{\text{отх}}$ – количество отходящих линий на стороне СН.

По каталогу выбираем ВБ-35-25/630 на номинальный ток 630А.

Напряжение в цепи выключателя:

$U_{\text{уст}} = 35 \text{ кВ} = U_{\text{ном}} = 35 \text{ кВ}.$

$I_{\text{max}} = 51{,}962 \text{ А} \le I_{\text{ном}} = 630 \text{ А}.$

Проверим выбранный выключатель по следующим условиям:

1.Возможность отключения апериодической составляющей тока к.з.:

$i_{a.\tau} \le i_{a.\text{ном}}$,

где $i_{a.\text{ном}}$ – номинальное допускаемое значение апериодической составляющей в отключаемом токе для времени τ; $i_{a,\tau}$ – апериодическая составляющая тока КЗ в момент расхождения контактов.

Апериодическая составляющая тока КЗ:

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{П0}} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 2598{,}642 \cdot e^{\frac{-0{,}05}{0{,}00269}} = 572{,}826 \text{ А},$$

$$\tau = t_{\text{з.мин}} + t_{\text{с.в}} = 0{,}01 + 0{,}04 = 0{,}05 \text{ с},$$

где T_a – постоянная времени цепи КЗ, учитывает влияние апериодической составляющей в токе КЗ; $I_{\text{П0}}$ – начальное значение периодической составляющей тока КЗ в цепи выключателя; τ – наименьшее время от начала КЗ до момента расхождения дугогасительных контактов, $t_{\text{з.мин}}$ = 0,01 с – минимальное время действия релейной защиты; $t_{\text{с.в}}$ – собственное время отключения выключателя.

Номинальное допустимое значение апериодической составляющей выключаемого тока:

$$i_{a.\text{ном}} = (\sqrt{2} \cdot \beta_{\text{ном}} \cdot I_{\text{откл.ном}})/100 = (\sqrt{2} \cdot 32 \cdot 25)/100 = 11{,}314 \text{ кА},$$

где $\beta_{\text{ном}}$ – нормированное процентное содержание апериодической составляющей в отключающем токе (по каталогу или рис.3); $I_{\text{откл.ном}}$ – номинальный ток отключения (по каталогу).

$i_{a.\tau} = 5{,}936 \text{ кА} \le i_{a.\text{ном}} = 14{,}314 \text{кА}$ – условие выполняется.

2.На электродинамическую стойкость:

$i_{\text{уд}} \le i_{\text{дин}}$,

где $i_{уд}$ – ударный ток КЗ в цепи выключателя; $i_{дин}$ – наибольший пик тока включения (ток электродинамической стойкости) по каталогу.

Ударный ток КЗ:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot I_{ПО} \cdot \left(1 + e^{-0,01/T_a}\right) = \sqrt{2} \cdot 2598,642 \cdot \left(1 + e^{-0,01/0,0269}\right) = 6208,138 \text{ кА},$$

$i_{уд} = 6,208 \text{кА} \le i_{дин} = 63 \text{кА}$ - условие выполняется.

3.На термическую стойкость:

$$I_T^2 \cdot t_T \ge B_к,$$

где I_T – ток термической стойкости по каталогу; t_T – длительность протекания тока термической стойкости по каталогу, с; $B_к$ – тепловой импульс тока КЗ (интеграл Джоуля) по расчету.

Тепловой импульс тока КЗ (расчетный):

$$B_K = I_{П0}^2 \cdot (t_{РЗА} + t_{выкл} + T_a) = 2598,642^2 \cdot (0,01 + 0,06 + 0,0269) =$$

$$= 10,654 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с},$$

где $t_{выкл}$ – полное время отключения выключателя (по каталогу $t_{выкл}$=0,06 с).

$I_t^2 \cdot t_t = 25^2 \cdot 3 = 1875 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$.

$I_T^2 \cdot t_T = 1875 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с} \ge B_к = 0,654 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$ – условие выполняется.

Выбор трансформаторов тока на стороне СН и контрольно-измерительных приборов.

Трансформаторы тока выбираются:

1.По напряжению установки: $U_{уст} \le U_{ном}$;

2.По длительному току: $I_{MAX,ТТ} \le I_{ном}$.

Выбранные трансформаторы проверяются по следующим условиям:

1.На электродинамическую стойкость: $i_у \le i_{пр.с}$;

2.На термическую стойкость: $B_K \le I_t^2 \cdot t_t$;

3.На вторичную нагрузку: $z_2 \le z_{2\,ном}$.

В качестве трансформаторов тока для ячейки ввода, секционной ячейки и отходящей линии выбран ТОЛ-СЭЩ-35 с различным номинальным током.

Ячейка ввода.

Максимальный ток:

$$I_{max,ТТ} = \frac{\sqrt{P_{СН}^2 + Q_{СН}^2}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}$$

где $P_{СН}$ – активная мощность на СН; $Q_{СН}$ – полная реактивная мощность на СН, $Q_{СН} = P_{СН} \cdot tg\varphi_{СН}$.

Таблица 6

Расчетные данные	Каталожные данные
$U_{\text{уст}} = 35$ кВ	$U_{\text{ном}} = 35$ кВ
$I_{max,\text{ТТ}} = \frac{\sqrt{P_{\text{СН}}^2 + Q_{\text{СН}}^2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{\sqrt{18^2 + 5{,}94^2} \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 35} = 312{,}673\,\text{А}$	$I_{\text{ном}} = 400$ А
$i_{\text{уд}} = 6{,}208$ кА	$i_{\text{дин}} = 80$ кА
$B_к = 7{,}407 \cdot 10^6$ А$^2 \cdot$ с	$I_t^2 \cdot t_t = 31{,}5^2 \cdot 3 = 2976{,}75 \cdot 10^6$ А$^2 \cdot$ с

Ячейка секционного выключателя.

Максимальный ток:

$$I_{max,\text{ТТ}} = \frac{\sqrt{P_{\text{СН}}^2 + Q_{\text{СН}}^2}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}.,$$

где $P_{\text{СН}}$ – активная мощность на СН; $Q_{\text{СН}}$ – полная реактивная мощность на СН, $Q_{\text{СН}} = P_{\text{СН}} \cdot tg\varphi_{\text{СН}}$

Таблица 7

Расчетные данные	Каталожные данные
$U_{\text{уст}} = 35$ кВ	$U_{\text{ном}} = 35$ кВ
$I_{max,\text{ТТ}} = \frac{\sqrt{P_{\text{СН}}^2 + Q_{\text{СН}}^2}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{\sqrt{18^2 + 5{,}94^2} \cdot 10^3}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 35} = 156{,}337\,\text{А}$	$I_{\text{ном}} = 200$ А
$i_{\text{уд}} = 6{,}208$ кА	$i_{\text{дин}} = 80$ кА
$B_к = 4{,}031 \cdot 10^6$ А$^2 \cdot$ с	$I_t^2 \cdot t_t = 31{,}5^2 \cdot 3 = 2976{,}75 \cdot 10^6$ А$^2 \cdot$ с

Ячейка отходящих линий.

Максимальный ток:

$$I_{max,\text{ТТ}} = \frac{\sqrt{P_{\text{СН}}^2 + Q_{\text{СН}}^2}}{N_{\text{отх}} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}.,$$

где $P_{\text{СН}}$ – активная мощность на СН; $Q_{\text{СН}}$ – полная реактивная мощность на СН, $Q_{\text{СН}} = P_{\text{СН}} \cdot tg\varphi_{\text{СН}}$, $N_{\text{отх}}$ – количество отходящих линий на стороне СН.

Таблица 8

Расчетные данные	Каталожные данные
$U_{уст} = 35$ кВ	$U_{ном} = 35$ кВ
$I_{max,ТТ} = \frac{\sqrt{P_{СН}^2 + Q_{СН}^2}}{N_{отх} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{\sqrt{10^2 + 5{,}94^2} \cdot 10^3}{6 \cdot \sqrt{3} \cdot 35} = 51{,}962$А	$I_{ном} = 80$ А
$i_{уд} = 6{,}208$кА	$i_{дин} = 39{,}1$кА
$B_к = 0{,}654 \cdot 10^6$ А$^2 \cdot$с	$I_t^2 \cdot t_t = 15{,}3^2 \cdot 3 = 702{,}27 \cdot 10^6$ А$^2 \cdot$с

Выбор вторичной нагрузки трансформатора тока и результаты выбора сводим в таблицу:

Таблица 9

Прибор	Тип	Нагрузка фаз, ВА		
		А	В	С
Амперметр	Э-335.1-1	0,5	-	-
Ваттметр	Д-365	0,5	-	0,5
Варметр	Д-365	0,5	-	0,5
Счетчик активной и реактивной энергии	Меркурий230ART03 P(Q)R(C) SIDN	0,1	-	0,1
Итого		1,6	-	1,1

Вторичная нагрузка r_2 включает сопротивления приборов $r_{приб}$, соединительных проводов $r_{пр}$ и переходного сопротивления контактов $r_к$:

$$r_2 = r_{приб} + r_{пр} + r_к.$$

Сопротивление приборов определяется по выражению

$$r_{приб} = \frac{S_{приб}}{I_2^2} = \frac{1{,}6}{5^2} = 0{,}064 \text{ Ом};$$

где $S_{приб}$ – мощность, потребляемая приборами; I_2 – вторичный номинальный ток прибора.

Сопротивление контактов принимается 0,05 Ом при двух-трех приборах и 0,1 Ом при большем числе приборов. Принимаем $r_к = 0{,}1$Ом.

Чтобы трансформатор тока работал в выбранном классе точности, необходимо выдержать условие:

$r_{\text{приб}} + r_{\text{пр}} + r_{\text{к}} \le z_{2\,\text{ном}}$.

Откуда,

$r_{\text{пр}} \le z_{2\,\text{ном}} - r_{\text{приб}} - r_{\text{к}}$.

Найдем $z_{2\,\text{ном}}$:

$$z_{2\,\text{ном}} = \frac{S_{\text{вт}}}{I_2^{\,2}} = \frac{20}{5^2} = 0{,}8\ \text{Ом},$$

где $S_{\text{вт}}$ – вторичная нагрузка трансформатора тока (по каталогу).

Сопротивление соединительных проводов:

$r_{\text{пр}} = z_{2\,\text{ном}} - r_{\text{пр}} - r_{\text{к}} = 0{,}8 - 0{,}1 - 0{,}064 = 0{,}636\ \text{Ом};$

Зная $r_{\text{пр}}$, можно определить сечение соединительных проводов

$$q = \frac{\rho l_{\text{расч}}}{r_{\text{пр}}} = \frac{0{,}0283 \cdot 75}{0{,}636} = 3{,}337\,\text{мм}^2.$$

где ρ – удельное сопротивление материала провода. Провода с медными жилами $\left(\rho = 0{,}0175\,\frac{\text{Ом}\cdot\text{мм}^2}{\text{м}}\right)$ применяются во вторичных цепях основного и вспомогательного оборудования мощных электростанций с агрегатами 100 МВт и более, а также на подстанциях с высшим напряжением 220 кВ и выше. В остальных случаях во вторичных цепях применяются провода с алюминиевыми жилами $\left(\rho = 0{,}0283\,\frac{\text{Ом}\cdot\text{мм}^2}{\text{м}}\right)$; $l_{\text{расч}}$ – расчетная длина, зависящая от схемы соединения трансформаторов тока (для подстанций длины снижаются на 15 – 20 %).

По условию прочности сечение не должно быть меньше 2,5 мм^2 для алюминиевых жил и 1,5 мм^2 для медных жил (ПУЭ, п. 3.4.4). Сечение больше 6 мм^2 обычно не применяется. Предварительно принимаем кабель сечением 4 мм^2 со следующими параметрами:

$q_{\text{ном}} = 4\,\text{мм}^2$ $r_0 = 7{,}9\,\text{Ом/км}.$

Определим сопротивление провода:

$r_{\text{пр}} = r_0 \cdot l_{\text{расч}} = 0{,}0079 \cdot 75 = 0{,}593\ \text{Ом};$

Найдем z_2 :

$z_2 = 0{,}593 + 0{,}064 + 0{,}1 = 0{,}757\ \text{Ом},$

$z_2 = 0{,}757\ \text{Ом} \le z_{2,\text{ном}} = 0{,}8\,\text{Ом}$ – условие выполняется.

Принимаем к установке контрольный кабель КВВГ с алюминиевыми жилами сечением жил 4 мм^2.

Выбор трансформаторов напряжения на стороне СН и контрольно-измерительных приборов.

Трансформаторы напряжения выбираются:

1.По напряжению установки: $U_{\text{уст}} \le U_{\text{ном}}$;

2.По вторичной нагрузке: $S_{2\Sigma} \le S_{\text{ном}}$.

Нагрузка всех измерительных приборов, присоединенных к трансформатору напряжения:

Таблица 10

Прибор	Тип	S одной обмотки, ВА	Число обмоток	Число приборов	Потребляемая мощность S, ВА
Вольтметр	Э-350	2	1	2	4
Вольтметр регистрир.	Н-394	10	1	1	10
Ваттметр	Д-365	2	2	3	12
Варметр	Д-365	2	2	3	12
Счетчик активной и реактивной энергии	Меркурий230ART 03 P(Q)R(C) SIDN	-	-	-	7,5
Фиксатор импульсного действия	ФИП-В	3	1	3	9
Итого					54,5

В качестве трансформатора напряжения для ячейки КРУ был выбран НАМИ-35 УХЛ2

Мощность нагрузки на вторичной обмотке трансформатора напряжения:

$S_{2\Sigma} = 54{,}5\ \text{ВА} < 1900\ \text{ВА}$ - условие выполняется.

Выбор жестких шин на СН.

Предварительно (по каталогу) применяем жесткую ошиновку СЭЩ сечением трубы 80×3 мм из алюминиевого сплава 1915.

1. Механический расчет однополосных шин.

Наибольшее удельное усилие при трехфазном КЗ:

$$f = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i_{уд}^2}{a} = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot \frac{6208^2}{0{,}44} = 15{,}171 \text{ Н/м},$$

где a – расстояние между фазами, м. (табл. 4.2.5 ПУЭ).

Изгибающий момент:

$$M_{max} = \frac{f \cdot l^2}{10} = \frac{15{,}171 \cdot 6^2}{10} = 54{,}616 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где l – длина пролета между опорными изоляторами шинной конструкции, м (принимают 2-10 м.).

Наружный и внутренний диаметры выбранной ошиновки сечением трубы 80×3мм:

$$D_{нар} = 80\text{мм}, d_{вн} = 74\text{мм}.$$

Найдем сечение q выбранной шины:

$$q = \pi \cdot \left(R_{нар}^2 - R_{вн}^2\right) = 3{,}14 \cdot \left(40^2 - 37^2\right) = 725{,}34 \text{ мм}^2.$$

Момент сопротивления шины относительно оси, перпендикулярной действию усилия:

$$W = \frac{\pi \cdot \left(D^4 - d^4\right)}{32 \cdot D} = \frac{3{,}14 \cdot \left(8^4 - 7{,}4^4\right)}{32 \cdot 8} = 13{,}46 \text{ см}.$$

Напряжение в материале шины, возникающее при воздействии изгибающего момента:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W} = \frac{54{,}616}{13{,}46} = 4{,}058 \text{ МПа}.$$

$\sigma_{max} \le \sigma_{доп}$ – условие механической прочности.

$\sigma_{доп} = 247$ МПа .

247 МПа ≥ 4,058 МПа – условие выполняется.

2. Проверка по нагреву (допустимому току).

Условие проверки:

$$I_{доп} \ge I_{max},$$

где $I_{доп}$ – допустимый ток на шины выбранного сечения с учетом поправки при температуре воздуха, отличной от принятой в таблицах ($\vartheta_{о.ном} = 25\ ^\circ C$).

$$I_{max} = \frac{\sqrt{P_{СН}^2 + Q_{СН}^2}}{\sqrt{3} \cdot U_{СН}} = \frac{\sqrt{18^2 + 5{,}94^2} \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 35} = 519{,}955 \text{ А}$$

$$I_{доп} = I_{доп.ном} \cdot \sqrt{\frac{\vartheta_{доп} - \vartheta_0}{\vartheta_{доп} - \vartheta_{0.доп}}},$$

где $I_{доп.ном}$ – допустимый ток по таблицам ПУЭ при температуре воздуха $\vartheta_{о.ном} = 25\ ^\circ\text{C}$; ϑ_0 – действительная температура воздуха, принимаем равным $\vartheta_0 = 40^\circ\text{C}$.

По табл. 1.3.30 ПУЭ (для алюминиевых труб) для выбранной ошиновки сечением трубы 80×3мм: $I_{\text{доп.ном}} = 1770\ \text{А}$.

Для неизолированных проводов и окрашенных шин принято:

$\vartheta_{\text{доп}} = 70°\text{C}, \vartheta_{0.\text{д.д}} = 25°\text{C}.$

Допустимый ток:

$$I_{\text{доп}} = 1770 \cdot \sqrt{\frac{70-40}{70-25}} = 1445{,}199\ \text{А};$$

$1445{,}199\text{А} \geq 519{,}955\ \text{А}$ – условие выполняется.

3. Проверка шин на термическую стойкость.

Условие проверки:

$q \geq q_{min}$,

где $q_{min} = \sqrt{B_K} / C_T$ – минимальное сечение проводника, которое при заданном токе КЗ обуславливает нагрев проводника до кратковременной допустимой температуры; q – выбранное сечение шины; B_K – интеграл Джоуля по расчету; C_T – функция, значения которой приведены при наихудшей начальной температуре $(120°C)$.

$$q_{min} = \frac{\sqrt{B_K}}{C_T} = \frac{\sqrt{7{,}407 \cdot 10^6}}{51} = 53{,}364\ \text{мм}^2,$$

$q_{min} = 53{,}364 мм^2 \leq q = 725{,}34\ \text{мм}^2$ – условие выполняется.

4. Проверка на электродинамическую стойкость с учетом механических колебаний.

Условие проверки:

$$J = \frac{\pi \cdot \left(D^4 - d^4\right)}{64} = \frac{3{,}14 \cdot \left(8^4 - 7{,}4^4\right)}{64} = 53{,}838\ \text{см}^4,$$

где J – момент инерции поперечного сечения шины относительно оси, перпендикулярной направлению изгибающей силы, см^4.

Частота собственных колебаний алюминиевых шин:

$$f_0 = \frac{173{,}2}{l^2}\sqrt{\frac{J}{q}} = \frac{173{,}2}{6^2}\sqrt{\frac{53{,}838}{7{,}2534}} = 13{,}107\text{Гц},$$

где l – длина пролета между изоляторами, м; q – выбранное сечение шины, см^2.

$13{,}107 < 30$ Гц – механический резонанс не возникает, условие выполняется.

Все условия выполняются. Окончательно выбираем жесткую ошиновку производства СЭЩ сечением трубы 80×3 мм из алюминиевого сплава 1915.

Выбор ОПН:

- ограничитель перенапряжения на стороне ОПН-35 УХЛ1, ОПНп-35-УХЛ3

Выбор изоляторов и предохранителей:

- проходные изоляторы ИП-35/1000-7,5 У3;
- предохранитель ПКН 001-35 У3.

6. Выбор оборудования на стороне НН

На стороне 10 кВ подстанции принимаем к установке комплектное распределительное устройство КРУ ZETO 10кВ.

Выбор выключателя на стороне НН.

Для выбора выключателя на стороне НН расчетной точкой является точка К3 и ток $I_{\text{ПО}} = 12803{,}093\ \text{А}$.

Выбор выключателя производится по следующим параметрам:

3. По напряжению установки: $U_{\text{уст}} \le U_{\text{ном}}$.

4. По длительному току: $I_{max} \le I_{\text{ном}}$.

Выключатель ячейки ввода.

Максимальный ток в цепи выключателя:

$$I_{max} = \frac{S_{max}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НН}}} = \frac{40 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10} = 2309{,}4\ \text{А},$$

где S_{max} - мощность трансформатора.

По каталогу выбираем ABB VD4/P12 на номинальный ток 2500А.

Напряжение в цепи выключателя:

$U_{\text{уст}} = 12\ \text{кВ} = U_{\text{ном}} = 10\ \text{кВ}.$

$I_{max} = 2309{,}4\text{А} \le I_{\text{ном}} = 2500\text{А}.$

Проверим выбранный выключатель по следующим условиям:

1.Возможность отключения апериодической составляющей тока к.з.:

$i_{a.\tau} \le i_{a.\text{ном}}$,

где $i_{a.\text{ном}}$ – номинальное допускаемое значение апериодической составляющей в отключаемом токе для времени τ; $i_{a,\tau}$ – апериодическая составляющая тока К3 в момент расхождения контактов.

Апериодическая составляющая тока К3:

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ПО}} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 12803{,}093 \cdot e^{\frac{-0{,}04}{0{,}0269}} = 4092{,}026\ \text{А},$$

$$\tau = t_{\text{з.мин}} + t_{\text{с.в}} = 0{,}01 + 0{,}03 = 0{,}04\ \text{с},$$

где T_a – постоянная времени цепи К3, учитывает влияние апериодической составляющей в токе К3; $I_{\text{П0}}$ – начальное значение периодической составляющей тока К3 в цепи выключателя; τ – наименьшее время от начала

КЗ до момента расхождения дугогасительных контактов, $t_{\text{з.мин}}$ = 0,01 с – минимальное время действия релейной защиты; $t_{\text{с.в}}$ – собственное время отключения выключателя.

Номинальное допустимое значение апериодической составляющей выключаемого тока:

$$i_{a.\text{ном}} = (\sqrt{2} \cdot \beta_{\text{ном}} \cdot I_{\text{откл.ном}})/100 = (\sqrt{2} \cdot 40 \cdot 40)/100 = 22{,}627 \text{ кА},$$

где $\beta_{\text{ном}}$ – нормированное процентное содержание апериодической составляющей в отключающем токе (по каталогу или рис.3); $I_{\text{откл.ном}}$ – номинальный ток отключения (по каталогу).

$i_{a.\tau} = 4{,}092\,\text{кА} \le i_{a.\text{ном}} = 22{,}627\text{кА}$ – условие выполняется.

2.На электродинамическую стойкость:

$$i_{\text{уд}} \le i_{\text{дин}},$$

где $i_{\text{уд}}$ – ударный ток КЗ в цепи выключателя; $i_{\text{дин}}$ – наибольший пик тока включения (ток электродинамической стойкости) по каталогу.

Ударный ток КЗ:

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ПО}} \cdot \left(1 + e^{-0{,}01/T_a}\right) = \sqrt{2} \cdot 12803{,}093 \cdot \left(1 + e^{-0{,}01/0{,}0269}\right) = 30591{,}124 \text{ кА},$$

$i_{\text{уд}} = 30{,}591\text{кА} \le i_{\text{дин}} = 128\text{кА}$ – условие выполняется.

3.На термическую стойкость:

$$I_T^2 \cdot t_T \ge B_к,$$

где I_T – ток термической стойкости по каталогу; t_T – длительность протекания тока термической стойкости по каталогу, с; $B_к$ – тепловой импульс тока КЗ (интеграл Джоуля) по расчету.

Тепловой импульс тока КЗ (расчетный):

$$B_K = I_{\text{П0}}^2 \cdot (t_{\text{РЗА}} + t_{\text{выкл}} + T_a + 2 \cdot \Delta t) = 12803{,}093^2 \cdot (0{,}01 + 0{,}0269 + 0{,}0269 + 2 \cdot 0{,}5) =$$

$$= 178{,}164 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с},$$

где $t_{\text{выкл}}$ – полное время отключения выключателя (по каталогу); Δt – время ступени селективности (избирательности), Δt = (0,3 - 0,5 и т.д.) с, (для выключателя ячейки ввода принимают $2\Delta t$).

$$I_t^2 \cdot t_t = 40^2 \cdot 3 = 4800 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с},$$

$I_T^2 \cdot t_T = 4800 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с} \ge B_к = 178{,}164 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$ – условие выполняется.

Секционный выключатель.

Максимальный ток в цепи выключателя:

$$I_{MAX,\text{раб}} = \frac{S_{max,\text{раб}}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{НН}}} = \frac{40 \cdot 10^3}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10} = 1154{,}7 A,$$

где $S_{max,\text{раб}}$ – мощность трансформатора.

По каталогу выбираем ВВЭ-М-10-20/1600 У3 на номинальный ток

1600А.

Напряжение в цепи выключателя:

$U_{\text{уст}} = 35кВ = U_{\text{ном}} = 35$ кВ.

$I_{\max} = 1154{,}7 \le I_{\text{ном}} = 1600$А.

Проверим выбранный выключатель по следующим условиям:

1.Возможность отключения апериодической составляющей тока к.з.:

$i_{a.\tau} \le i_{a.\text{ном}}$,

где $i_{a.\text{ном}}$ – номинальное допускаемое значение апериодической составляющей в отключаемом токе для времени τ; $i_{a,\tau}$ – апериодическая составляющая тока КЗ в момент расхождения контактов.

Апериодическая составляющая тока КЗ:

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{П}0} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 12803{,}093 \cdot e^{\frac{-0{,}04}{0{,}0269}} = 1092{,}026 \text{ А},$$

$$\tau = t_{\text{з.мин}} + t_{\text{с.в}} = 0{,}01 + 0{,}03 = 0{,}04 \text{ с},$$

где T_a – постоянная времени цепи КЗ, учитывает влияние апериодической составляющей в токе КЗ; $I_{\text{П}0}$ – начальное значение периодической составляющей тока КЗ в цепи выключателя; τ – наименьшее время от начала КЗ до момента расхождения дугогасительных контактов, $t_{\text{з.мин}}$ = 0,01 с – минимальное время действия релейной защиты; $t_{\text{с.в}}$ – собственное время отключения выключателя.

Номинальное допустимое значение апериодической составляющей выключаемого тока:

$$i_{a.\text{ном}} = (\sqrt{2} \cdot \beta_{\text{ном}} \cdot I_{\text{откл.ном}})/100 = (\sqrt{2} \cdot 20 \cdot 40)/100 = 11{,}314 \text{ кА},$$

где $\beta_{\text{ном}}$ – нормированное процентное содержание апериодической составляющей в отключающем токе (по каталогу или рис.3); $I_{\text{откл.ном}}$ – номинальный ток отключения (по каталогу).

$i_{a.\tau} = 4{,}092 \text{ кА} \le i_{a.\text{ном}} = 11{,}314 \text{кА}$ – условие выполняется.

2.На электродинамическую стойкость:

$i_{\text{уд}} \le i_{\text{дин}}$,

где $i_{\text{уд}}$ – ударный ток КЗ в цепи выключателя; $i_{\text{дин}}$ – наибольший пик тока включения (ток электродинамической стойкости) по каталогу.

Ударный ток КЗ:

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ПО}} \cdot \left(1 + e^{-0{,}01/T_a}\right) = \sqrt{2} \cdot 12803{,}093 \cdot \left(1 + e^{-0{,}01/0{,}0269}\right) = 30591{,}124\text{кА},$$

$i_{\text{уд}} = 30{,}59\text{кА} \le i_{\text{дин}} = 51\text{кА}$ - условие выполняется.

3.На термическую стойкость:

$I_T^2 \cdot t_T \ge B_к$,

где I_T – ток термической стойкости по каталогу; t_T – длительность протекания тока термической стойкости по каталогу, с; $B_к$ – тепловой импульс тока КЗ (интеграл Джоуля) по расчету.

Тепловой импульс тока КЗ (расчетный):

$$B_K = I_{П0}^2 \cdot (t_{РЗА} + t_{выкл} + T_a + \Delta t) = 12803{,}093^2 \cdot (0{,}01 + 0{,}04 + 0{,}0269 + 0{,}5) =$$

$$= 94{,}565 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с},$$

где $t_{выкл}$ – полное время отключения выключателя (по каталогу $t_{выкл}$ = 0,04 с); Δt – время ступени селективности (избирательности), Δt =0,5 с, (для секционного выключателя принимают Δt).

$$I_t^2 \cdot t_t = 20^2 \cdot 3 = 1200 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}.$$

$I_T^2 \cdot t_T = 1200 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с} \geq B_к = 494{,}565 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$ – условие выполняется.

Выключатель отходящих линий.

Максимальный ток в цепи выключателя:

$$I_{MAX,раб} = \frac{\sqrt{P_{НН}^2 + Q_{НН}^2}}{N_{отх} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{НН}} = \frac{\sqrt{12^2 + (12 \cdot 0{,}72)^2} \cdot 10^3}{12 \cdot \sqrt{3} \cdot 10} = 58{,}231 \text{ А}$$

где $P_{НН}$ – активная мощность на НН; $Q_{НН}$ – полная реактивная мощность на НН, $Q_{НН} = P_{НН} \cdot tg\varphi_{НН}$; $N_{отх}$ – количество отходящих линий на стороне НН.

По каталогу выбираем ВВЭ-М-10-20/630У3 на номинальный ток 630А.

Напряжение в цепи выключателя:

$U_{уст} = 10$ кВ $= U_{ном} = 10$ кВ.

$I_{max} = 58{,}32$ А $\leq I_{ном} = 630$ А.

Проверим выбранный выключатель по следующим условиям:

1.Возможность отключения апериодической составляющей тока к.з.:

$$i_{a.\tau} \leq i_{a.ном},$$

где $i_{a.ном}$ – номинальное допускаемое значение апериодической составляющей в отключаемом токе для времени τ; $i_{a,\tau}$ – апериодическая составляющая тока КЗ в момент расхождения контактов.

Апериодическая составляющая тока КЗ:

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{П0} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 12803{,}093 \cdot e^{\frac{-0{,}03}{0{,}0269}} = 5935{,}9 \text{ А},$$

$$\tau = t_{з.мин} + t_{с.в} = 0{,}01 + 0{,}02 = 0{,}03 \text{ с},$$

где T_a – постоянная времени цепи КЗ, учитывает влияние апериодической составляющей в токе КЗ; $I_{П0}$ – начальное значение периодической составляющей тока КЗ в цепи выключателя; τ – наименьшее время от начала КЗ до момента расхождения дугогасительных контактов, $t_{з.мин}$ = 0,01 с – минимальное время действия релейной защиты; $t_{с.в}$ – собственное время отключения выключателя.

Номинальное допустимое значение апериодической составляющей выключаемого тока:

$$i_{a.\text{ном}} = (\sqrt{2} \cdot \beta_{\text{ном}} \cdot I_{\text{откл.ном}})/100 = (\sqrt{2} \cdot 20 \cdot 52)/100 = 14{,}708 \text{ кА},$$

где $\beta_{\text{ном}}$ – нормированное процентное содержание апериодической составляющей в отключающем токе (по каталогу или рис.3); $I_{\text{откл.ном}}$ – номинальный ток отключения (по каталогу).

$i_{a.\tau} = 5{,}936\,\text{кА} \le i_{a.\text{ном}} = 14{,}708\text{кА}$ – условие выполняется.

2.На электродинамическую стойкость:

$$i_{\text{уд}} \le i_{\text{дин}},$$

где $i_{\text{уд}}$ – ударный ток КЗ в цепи выключателя; $i_{\text{дин}}$ – наибольший пик тока включения (ток электродинамической стойкости) по каталогу.

Ударный ток КЗ:

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ПО}} \cdot \left(1 + e^{-0{,}01/T_a}\right) = \sqrt{2} \cdot 12803{,}093 \cdot \left(1 + e^{-0{,}01/0{,}0269}\right) = 30591{,}124 \text{ кА},$$

$i_{\text{уд}} = 30{,}591\text{кА} \le i_{\text{дин}} = 51\text{кА}$ - условие выполняется.

3.На термическую стойкость:

$$I_T^2 \cdot t_T \ge B_к,$$

где I_T – ток термической стойкости по каталогу; t_T – длительность протекания тока термической стойкости по каталогу, с; $B_к$ – тепловой импульс тока КЗ (интеграл Джоуля) по расчету.

Тепловой импульс тока КЗ (расчетный):

$$B_K = I_{\text{П0}}^2 \cdot (t_{\text{РЗА}} + t_{\text{выкл}} + T_a) = 12803{,}093^2 \cdot (0{,}01 + 0{,}04 + 0{,}0269) =$$

$$= 12{,}605 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с},$$

где $t_{\text{выкл}}$ – полное время отключения выключателя (по каталогу $t_{\text{выкл}}$=0,04 с).

$I_t^2 \cdot t_t = 20^2 \cdot 3 = 1200 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$.

$I_T^2 \cdot t_T = 1200 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с} \ge B_к = 12{,}605 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$ – условие выполняется.

Выбор трансформаторов тока на стороне НН и контрольно-измерительных приборов.

Трансформаторы тока выбираются:

1.По напряжению установки: $U_{\text{уст}} \le U_{\text{ном}}$;

2.По длительному току: $I_{MAX,\text{ТТ}} \le I_{\text{ном}}$.

Выбранные трансформаторы проверяются по следующим условиям:

1.На электродинамическую стойкость: $i_{\text{у}} \le i_{\text{пр.с}}$;

2.На термическую стойкость: $B_K \le I_t^2 \cdot t_t$;

3.На вторичную нагрузку: $z_2 \le z_{2\,\text{ном}}$.

В качестве трансформаторов тока для ячейки ввода, секционной ячейки и отходящей линии выбран ТПЛ-10-М с различным номинальным током.

Ячейка ввода.

Максимальный ток:

$$I_{max,\text{ТТ}} = \frac{\sqrt{P_{\text{НН}}^2 + Q_{\text{НН}}^2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}$$

где $P_{\text{НН}}$ – активная мощность на НН; $Q_{\text{НН}}$ – полная реактивная мощность на НН, $Q_{\text{НН}} = P_{\text{НН}} \cdot tg\varphi_{\text{НН}}$.

Таблица 6

Расчетные данные	Каталожные данные
$U_{\text{уст}} = 10\ \text{кВ}$	$U_{\text{ном}} = 10\ \text{кВ}$
$I_{max,\text{ТТ}} = \frac{\sqrt{P_{\text{НН}}^2 + Q_{\text{НН}}^2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{\sqrt{12^2 + 3{,}52^2} \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10} = 722{,}534\ \text{А}$	$I_{\text{ном}} = 750\ \text{А}$
$i_{\text{уд}} = 30{,}591\text{кА}$	$i_{\text{дин}} = 200\ \text{кА}$
$B_к = 178{,}164 \cdot 10^6\ \text{А}^2 \cdot \text{с}$	$I_t^2 \cdot t_t = 45^2 \cdot 3 = 6075 \cdot 10^6\ \text{А}^2 \cdot \text{с}$

Ячейка секционного выключателя.

Максимальный ток:

$$I_{max,\text{ТТ}} = \frac{\sqrt{P_{\text{НН}}^2 + Q_{\text{НН}}^2}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}.,$$

где $P_{\text{НН}}$ – активная мощность на НН; $Q_{\text{НН}}$ – полная реактивная мощность на НН, $Q_{\text{НН}} = P_{\text{НН}} \cdot tg\varphi_{\text{НН}}$

Таблица 7

Расчетные данные	Каталожные данные
$U_{\text{уст}} = 10\ \text{кВ}$	$U_{\text{ном}} = 10\ \text{кВ}$
$I_{max,\text{ТТ}} = \frac{\sqrt{P_{\text{НН}}^2 + Q_{\text{НН}}^2}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{\sqrt{12^2 + 3{,}552^2} \cdot 10^3}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10} = 361{,}267\text{А}$	$I_{\text{ном}} = 400\ \text{А}$
$i_{\text{уд}} = 30{,}591\text{кА}$	$i_{\text{дин}} = 200\ \text{кА}$
$B_к = 94{,}565 \cdot 10^6\ \text{А}^2 \cdot \text{с}$	$I_t^2 \cdot t_t = 45^2 \cdot 3 = 6075 \cdot 10^6\ \text{А}^2 \cdot \text{с}$

Ячейка отходящих линий.

Максимальный ток:

$$I_{max,\text{ТТ}} = \frac{\sqrt{P_{\text{НН}}^2 + Q_{\text{НН}}^2}}{N_{\text{отх}} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}.,$$

где $P_{\text{НН}}$ – активная мощность на НН; $Q_{\text{НН}}$ – полная реактивная мощность на НН, $Q_{\text{НН}} = P_{,\text{НН}} \cdot tg\varphi_{\text{НН}}$, $N_{\text{отх}}$ – количество отходящих линий на стороне НН.

Таблица 8

Расчетные данные	Каталожные данные
$U_{\text{уст}} = 10\,\text{кВ}$	$U_{\text{ном}} = 10\,\text{кВ}$
$I_{max,\text{ТТ}} = \frac{\sqrt{P_{\text{НН}}^2 + Q_{\text{НН}}^2}}{N_{\text{отх}} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{\sqrt{12^2 + (12 \cdot 0{,}72)^2} \cdot 10^3}{12 \cdot \sqrt{3} \cdot 10} = 58{,}321\text{А}$	$I_{\text{ном}} = 75\text{А}$
$i_{\text{уд}} = 30{,}591\,\text{кА}$	$i_{\text{дин}} = 265\,\text{кА}$
$B_к = 12{,}605 \cdot 10^6\ \text{А}^2 \cdot \text{с}$	$I_t^2 \cdot t_t = 60^2 \cdot 3 = 10800 \cdot 10^6\,\text{А}^2 \cdot \text{с}$

Выбор вторичной нагрузки трансформатора тока и результаты выбора сводим в таблицу:

Таблица 9

Прибор	Тип	Нагрузка фаз, ВА		
		А	В	С
Амперметр	Э-335.1-1	0,5	-	-
Ваттметр	Д-365	0,5	-	0,5
Варметр	Д-365	0,5	-	0,5
Счетчик активной и реактивной энергии	Меркурий230ART03 P(Q)R(C) SIDN	0,1	-	0,1
Итого		1,6	-	1,1

Вторичная нагрузка r_2 включает сопротивления приборов $r_{\text{приб}}$, соединительных проводов $r_{\text{пр}}$ и переходного сопротивления контактов $r_{\text{к}}$:

$$r_2 = r_{\text{приб}} + r_{\text{пр}} + r_{\text{к}}.$$

Сопротивление приборов определяется по выражению

$$r_{\text{приб}} = \frac{S_{\text{приб}}}{I_2{}^2} = \frac{1{,}6}{5^2} = 0{,}064 \text{ Ом};$$

где $S_{\text{приб}}$ – мощность, потребляемая приборами; I_2 – вторичный номинальный ток прибора.

Сопротивление контактов принимается 0,05 Ом при двух-трех приборах и 0,1 Ом при большем числе приборов. Принимаем $r_{\text{к}} = 0{,}1$Ом.

Чтобы трансформатор тока работал в выбранном классе точности, необходимо выдержать условие:

$$r_{\text{приб}} + r_{\text{пр}} + r_{\text{к}} \le z_{2\,\text{ном}}.$$

Откуда,

$$r_{\text{пр}} \le z_{2\,\text{ном}} - r_{\text{приб}} - r_{\text{к}}.$$

Найдем $z_{2\,\text{ном}}$:

$$z_{2\,\text{ном}} = \frac{S_{\text{вт}}}{I_2{}^2} = \frac{15}{5^2} = 0{,}6 \text{ Ом},$$

где $S_{\text{вт}}$ – вторичная нагрузка трансформатора тока (по каталогу).

Сопротивление соединительных проводов:

$$r_{\text{пр}} = z_{2\,\text{ном}} - r_{\text{пр}} - r_{\text{к}} = 0{,}6 - 0{,}1 - 0{,}064 = 0{,}436 \text{ Ом};$$

Зная $r_{\text{пр}}$, можно определить сечение соединительных проводов

$$q = \frac{\rho l_{\text{расч}}}{r_{\text{пр}}} = \frac{0{,}0283 \cdot 80}{0{,}436} = 5{,}193 \text{мм}^2$$

где ρ – удельное сопротивление материала провода. Провода с медными жилами $\left(\rho = 0{,}0175 \dfrac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}\right)$ применяются во вторичных цепях основного и вспомогательного оборудования мощных электростанций с агрегатами 100 МВт и более, а также на подстанциях с высшим напряжением 220 кВ и выше. В остальных случаях во вторичных цепях применяются провода с алюминиевыми жилами $\left(\rho = 0{,}0283 \dfrac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}\right)$; $l_{\text{расч}}$ – расчетная длина, зависящая от схемы соединения трансформаторов тока (для подстанций длины снижаются на 15 – 20 %).

По условию прочности сечение не должно быть меньше 2,5 мм^2 для алюминиевых жил и 1,5 мм^2 для медных жил (ПУЭ, п. 3.4.4). Сечение больше 6 мм^2 обычно не применяется. Предварительно принимаем кабель сечением 4 мм^2 со следующими параметрами:

$q_{\text{ном}} = 6 \text{мм}^2$ $r_0 = 5{,}25 \text{Ом/км}$.

Определим сопротивление провода:

$r_{пр} = r_0 \cdot l_{расч} = 0{,}00525 \cdot 80 = 0{,}42$ Ом;

Найдем z_2 :

$z_2 = 0{,}42 + 0{,}064 + 0{,}1 = 0{,}584$ Ом,

$z_2 = 0{,}584$ Ом $\le z_{2,ном} = 0{,}6$ Ом – условие выполняется.

Принимаем к установке контрольный кабель КВВГ с алюминиевыми жилами сечением жил 6 мм^2.

Выбор трансформаторов напряжения на стороне СН и контрольно-измерительных приборов.

Трансформаторы напряжения выбираются:

1.По напряжению установки: $U_{уст} \le U_{ном}$;

2.По вторичной нагрузке: $S_{2\Sigma} \le S_{ном}$.

Нагрузка всех измерительных приборов, присоединенных к трансформатору напряжения:

Таблица 10

Прибор	Тип	S одной обмотки, ВА	Число обмоток	Число приборов	Потребляемая мощность S, ВА
Вольтметр	Э-350	2	1	2	4
Вольтметр регистрир.	Н-394	10	1	1	10
Ваттметр	Д-365	2	2	3	12
Варметр	Д-365	2	2	3	12
Счетчик активной и реактивной энергии	Меркурий230ART 03 P(Q)R(C) SIDN	-	-	-	7,5
Фиксатор импульсного действия	ФИП-В	3	1	3	9
Итого					54,5

В качестве трансформатора напряжения для ячейки КРУ был выбран НАМИ-10-95 УХЛ2

Мощность нагрузки на вторичной обмотке трансформатора напряжения:
$S_{2\Sigma} = 54{,}5\ \text{ВА} < 900\ \text{ВА}$ - условие выполняется.

Выбор жестких шин на НН.

Предварительно (по каталогу) применяем жесткую ошиновку Т-энергия сплошным круглым сечением 42 мм^2 из алюминиевого сплава 1915.

5. Механический расчет однополосных шин.

Наибольшее удельное усилие при трехфазном КЗ:

$$f = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i_{уд}^2}{a} = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot \frac{30591{,}124^2}{0{,}22} = 736{,}765\ \text{Н/м},$$

где a – расстояние между фазами, м. (табл. 4.2.5 ПУЭ).

Изгибающий момент:

$$M_{max} = \frac{f \cdot l^2}{10} = \frac{736{,}765 \cdot 3^2}{10} = 663{,}089\ \text{Н} \cdot \text{м},$$

где l – длина пролета между опорными изоляторами шинной конструкции, м (принимают 2-10 м.).

Наружный и внутренний диаметры выбранной ошиновки сечением трубы 80×4 мм:

Параметры выбранной ошиновки сечением трубы D=42 мм.

Найдем сечение q выбранной шины:

$q = \pi \cdot R^2 = 3{,}14 \cdot 21^2 = 1384{,}74\ \text{мм}^2$.

Момент сопротивления шины относительно оси, перпендикулярной действию усилия:

$$W = \frac{\pi \cdot D^3}{32 \cdot} = \frac{3{,}14 \cdot 4{,}2^3}{32 \cdot} = 7{,}27\ \text{см}.$$

Напряжение в материале шины, возникающее при воздействии изгибающего момента:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W} = \frac{663{,}089}{7{,}27} = 91{,}209\ \text{МПа}.$$

$\sigma_{max} \le \sigma_{доп}$ – условие механической прочности.

$\sigma_{доп} = 247$ МПа .

$247\ \text{МПа} \ge 91{,}209\ \text{МПа}$ – условие выполняется.

6. Проверка по нагреву (допустимому току).

Условие проверки:

$I_{доп} \ge I_{max}$,

где $I_{доп}$ – допустимый ток на шины выбранного сечения с учетом поправки при температуре воздуха, отличной от принятой в таблицах ($\vartheta_{о.ном} = 25\ ^\circ C$).

$$I_{max} = \frac{\sqrt{P_{НН}^2 + Q_{НН}^2}}{\sqrt{3} \cdot U_{НН}} = \frac{\sqrt{12^2 + 3{,}552^2} \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10} = 722{,}534\,А$$

$$I_{доп} = I_{доп.ном} \cdot \sqrt{\frac{\vartheta_{доп} - \vartheta_0}{\vartheta_{доп} - \vartheta_{0.доп}}},$$

где $I_{доп.ном}$ – допустимый ток по таблицам ПУЭ при температуре воздуха $\vartheta_{о.ном} = 25\ °С$; ϑ_0 – действительная температура воздуха, принимаем равным $\vartheta_0 = 40°С$.

По табл. 1.3.30 ПУЭ (для алюминиевых труб) для выбранной ошиновки сплошным круглым сечением трубы $42мм_2$: $I_{доп.ном} = 1700\ А$.

Для неизолированных проводов и окрашенных шин принято:
$\vartheta_{доп} = 70°С, \vartheta_{0.д.д} = 25°С.$

Допустимый ток:

$$I_{доп} = 1700 \cdot \sqrt{\frac{70 - 40}{70 - 25}} = 1388{,}9\ А;$$

$1388{,}9А \geq 722{,}534\,А$ – условие выполняется.

7. Проверка шин на термическую стойкость.

Условие проверки:

$q \geq q_{min}$,

где $q_{min} = \sqrt{B_K} / C_T$ – минимальное сечение проводника, которое при заданном токе КЗ обуславливает нагрев проводника до кратковременной допустимой температуры; q – выбранное сечение шины; B_K – интеграл Джоуля по расчету; C_T – функция, значения которой приведены при наихудшей начальной температуре $(120°С)$.

$$q_{min} = \frac{\sqrt{B_K}}{C_T} = \frac{\sqrt{178{,}164 \cdot 10^6}}{51} = 261{,}722\ мм^2,$$

$q_{min} = 261{,}722 мм^2 \leq q = 1384{,}74\ мм^2$ – условие выполняется.

7. Проверка на электродинамическую стойкость с учетом механических колебаний.

Условие проверки:

$$J = \frac{\pi \cdot d^4}{64} = \frac{3{,}14 \cdot 4{,}2^2}{64} = 15{,}267\ см^4,$$

где J – момент инерции поперечного сечения шины относительно оси, перпендикулярной направлению изгибающей силы, $см^4$.

Частота собственных колебаний алюминиевых шин:

$$f_0 = \frac{173{,}2}{l} \sqrt{\frac{J}{q}} = \frac{173{,}2}{3} \sqrt{\frac{15{,}267}{1384{,}74}} = 6{,}06Гц,$$

Где l – длина пролета между изоляторами, м; q – выбранное сечение шины, см^2.

$6{,}06 < 30$ Гц – механический резонанс не возникает, условие выполняется.

Все условия выполняются. Окончательно выбираем жесткую ошиновку производства Т-Энергия сплошным круглым сечением 42 мм^2 из алюминиевого сплава 1915Т.

Выбор кабеля для КУ.

Выбираем кабель:

1. По напряжению: $U_{НОМ}$=10кВ ≥ $U_{СЕТ,НОМ}$ =10 кВ.

2. По конструкции: выбираем для прокладки в туннелях, с алюминиевыми жилами, с изоляцией из сшитого полиэтилена, в оболочке из полиэтилена – АПвП.

3. По экономической плотности тока:

Максимальный ток:

$$I_{MAX} = \frac{Q_{KУ}}{\sqrt{3}U_H} = \frac{2550}{\sqrt{3}\cdot 10} = 147{,}224 \text{ мм}^2,$$

где $Q_{КУ}$ – мощность одного компенсирующего устройства, кВАр.

$$q_Э = \frac{I_{MAX}}{j_Э} = \frac{147{,}224}{1{,}1} = 133{,}84 \text{ мм}^2,$$

где $j_Э$ – экономическая плотность тока, А/мм^2 (табл. 1.3.36 ПУЭ). Сечение округляем до ближайшего стандартного – 150 мм^2 . Выбираем по каталогу кабель АПвП 1х150/25.

4. По допустимому току:

$I_{ДОП} \geq I_{MAX,}$

где $I_{ДОП}$ – длительно допустимый ток с учетом поправки на число рядом положенных в земле кабелей k_1 (табл. 1.3.26 ПУЭ, принимаем количество кабелей 2, расстояние между кабелями в свету 100 мм) и на температуру окружающей среды k_2 (табл. 1.3.3 ПУЭ, принять условную температуру среды 25 °С, нормированная температура жил для кабелей с резиновой и пластмассовой изоляцией – 65 °С).

$$I_{ДОП} = I_{ДОП.НОМ} \cdot k_1 \cdot k_2 = 340 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}71 = 217{,}26 \text{ А}.$$

где $I_{ДОП.НОМ}$ – допустимый ток при нормированной температуре жил (табл. 1.3.7 ПУЭ)

217,26А ≥ 147,224А – условие выполняется.

Проверка выбранного кабеля на термическую стойкость:

Условие проверки:

$q \geq q_{min}$,

где q_{min} – минимальное сечение проводника, которое при заданном токе КЗ обуславливает нагрев проводника до кратковременной допустимой температуры; q – выбранное сечение шины; B_K – интеграл Джоуля по расчету; C_T – функция, значения которой приведены при наихудшей начальной температуре $(120°C)$.

$$q_{min} = \frac{\sqrt{B_K}}{C_T} = \frac{\sqrt{39{,}448 \cdot 10^6}}{90} = 39{,}448 \text{ мм}^2,$$

$q_{min} = 39{,}448 мм^2 \le q = 150 \text{ мм}^2$ – условие выполняется.

Все условия выполняются. Окончательно выбираем кабель с одной алюминиевой жилой, с изоляцией из сшитого полиэтилена для прокладки в туннелях АПвП 1х150/25.

Выбор ОПН:

- ограничитель ОПН-П-10 УХЛ3, ОПН-Ф-10-УХЛ1.

Выбор изоляторов и предохранителей:

- проходные изоляторы ИП-10/1000-750У3;
- предохранитель ПКН 001-10 У3.

6.1. Выбор трансформатора собственных нужд

Состав потребителей собственных нужд подстанции зависит от типа подстанции, мощности трансформаторов, наличия синхронных компенсаторов, типа электрооборудования, способа обслуживания и вида оперативного тока.

Мощность трансформаторов собственных нужд выбирается по нагрузкам собственных нужд с учетом коэффициента загрузки и одновременности (коэффициент спроса), ориентировочно $К_с$ принимается равным 0,8.

Выбираем на проектируемой подстанции постоянный оперативный ток. Источником постоянного оперативного тока служит аккумуляторная батарея.

На подстанции необходимо установить два трансформатора собственных нужд, подключенных к разным источникам питания на стороне НН. При расчете собственных нужд, учитываем, что для двигательной нагрузки *cos* φ = 0,85, а для остальных потребителей *cos* φ = 1.

Таблица 16

Наименование потребителя	Установленная мощность	*cos* φ	$К_с$	Расчетная нагрузка

	Единицы, кол-во· кВт	Всего кВт			*S*, кВА
Подзарядно-зарядный агрегат	70	70	1	0,12	8,4
Освещение ОРУ 110 кВ	6	6	1	0,5	3
Подогрев КРУ 10 кВ	21·1	21	1	1	21
Подогрев КРУ 35 кВ	10·1	10	1	1	10
Подогрев приводов разъединителей	10·0,6	6,0	1	1	6,0
Отопление, освещение, вентиляция КРУ	2 ·5	10	0,85	0,7	8,2
Отопление, освещение, вентиляция здания персонала	5,5	5,5	1	0,7	3,85
Компрессорное хозяйство	20	20	0,85	0,4	9,4
Масляное хозяйство	75	75	0,85	0,8	70,6
Мощность устройств охлаждения трансформаторов	2·3,5	7	0,85	0,85	7
Наружное освещение	1,5·1	1,5	1	1	1,5
Оперативные цепи и цепи управления	5,5·1	5,5	1	1	5,5
Аппаратура связи и телемеханики	5,8·1	5,8	1	1	5,8

Прочие (небольшой ремонт, устройства РПН, дистилляторы, обогрев и освещение проходной)	2,5·1	2,5	1	1	2,5
Итого:					162,75

Суммарная расчётная нагрузка потребителей СН с учётом коэффициента одновременности и загрузки:

$$S_{\text{расч}} = \text{K}_\text{С} \cdot \sqrt{\left(\sum P_{\text{уст}}\right)^2 + \left(\sum Q_{\text{уст}}\right)^2} \text{ кВА;}$$

Для выбора мощности трансформаторов собственных нужд, учитываем, что подстанция без дежурного персонала, тогда должно выполняться условие: $S_\text{т} \geq S_{\text{расч}}$ кВА.

Число трансформаторов собственных нужд принимаем два.

Выбираем трансформатор собственных нужд мощностью 250 кВ·А марки ТМ-250/10.

В системе постоянного оперативного тока в качестве источника постоянного оперативного тока используют аккумуляторные батареи СК (стационарный свинцово-кислотный для кратковременных разрядов аккумулятор) или СН (стационарный аккумулятор с пластинами намазного типа) типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М.: ЭНАС, 2002.

2. Рожкова Л.Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций: учебник для студ. проф. Образования / Л.Д. Рожкова, Л.К. Карнеева, Т.В.Чиркова. – 4-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2007.

3. Ополева Г.Н. Схемы и подстанции электроснабжения: Справочник: Учеб. пособие. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2006.

4. Карапетян И.Г. Справочник по проектированию электрических сетей: Справочник: Учеб.пособие/ И.Г. Карапетян, Д.Л. Файбисович, И.М. Шапиро.-2-е изд., перераб. И доп.-М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006.-352 с.: ил.

5. Кулеева Л.И. Проектирование подстанции: учебное пособие / Л.И. Кулеева, С.В. Митрофанов, Л.А. Семенова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2016.

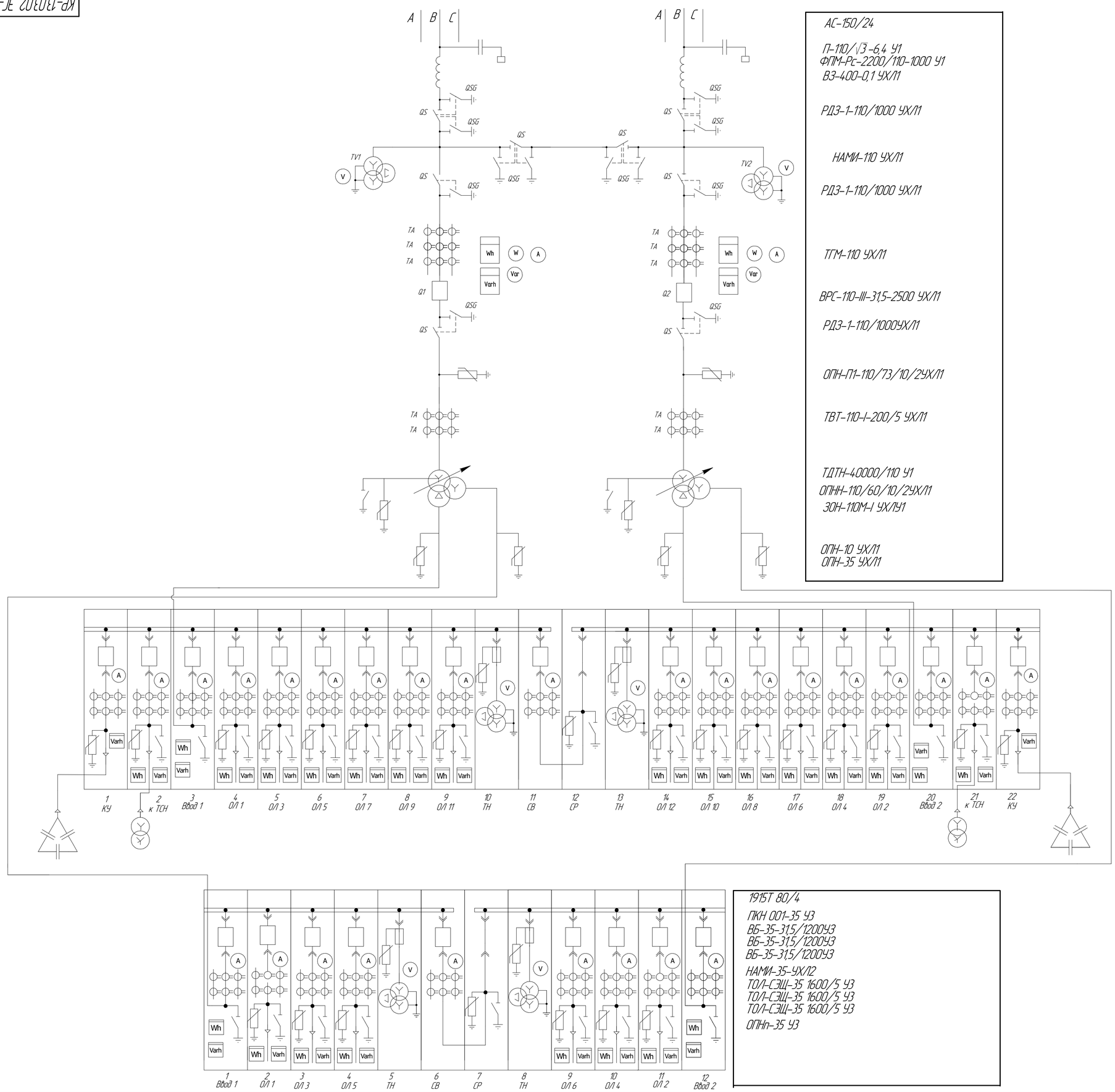
6. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. РД 153-34.0-20.527–98. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002.

7. Завод электротехнического оборудования ZETO. URL: https://zeto.ru/ (дата обращения: 15.04.2020).

7. Конталин электротехнический завод. URL: http://www.konstalin.ru/ (дата обращения: 20.03.2020).

8.Электрические сети, оборудование электроустановок. URL: http://forca.ru/ (дата обращения: 23.03.20).

КР-13.03.02 ЭС-3-16.2020



АС-150/24

П-110/√3-6,4 У1
ФПМ-Рс-2200/110-1000 У1
ВЗ-400-0,1 УХЛ1

РДЗ-1-110/1000 УХЛ1

НАМИ-110 УХЛ1

РДЗ-1-110/1000 УХЛ1

ТГМ-110 УХЛ1

ВРС-110-III-31,5-2500 УХЛ1

РДЗ-1-110/1000УХЛ1

ОПН-П1-110/73/10/2УХЛ1

ТВТ-110-I-200/5 УХЛ1

ТДТН-40000/110 У1
ОПНН-110/60/10/2УХЛ1
ЗОН-110М-I УХЛ1У1

ОПН-10 УХЛ1
ОПН-35 УХЛ1

1915Т 42

ПКН 001-10 У3
VD4/P12.25
VD4/P12.12
VD4/P12.06
НАМИ-10-95-УХЛ 2
ТПЛ-10М-1500/5 У3
ТПЛ-10М-750/5 У3
ТПЛ-10М-200/5 У3

ОПНп-10 УХЛ3

ТМ-250/10
АПвП 1х150/25
УКРМ-10-2550 У1

1915Т 80/4

ПКН 001-35 У3
ВБ-35-31,5/1200У3
ВБ-35-31,5/1200У3
ВБ-35-31,5/1200У3

НАМИ-35-УХЛ2
ТОЛ-СЭЩ-35 1600/5 У3
ТОЛ-СЭЩ-35 1600/5 У3
ТОЛ-СЭЩ-35 1600/5 У3

ОПНп-35 У3

					КР-13.03.02. ЭС-3-16.2020		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Основы проектирования подстанций, линий электропередачи с учетом нормативных требований	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.		Нусамиев Н.Ш.		13.05.20				
Пров.		Гарифуллин М.Ш.		13.05.20		Лист	Листов 1
Т.контр.					Однолинейная схема ПС №1	КГЭУ Каф. ЭСиС	
Н.контр.		Гарифуллин М.Ш.		13.05.20			
Утв.		Максимов В.В.		13.05.20			

Копировал

Формат А1

Перв. примен.

Справ. №

Подп. и дата

Инв. № дубл.

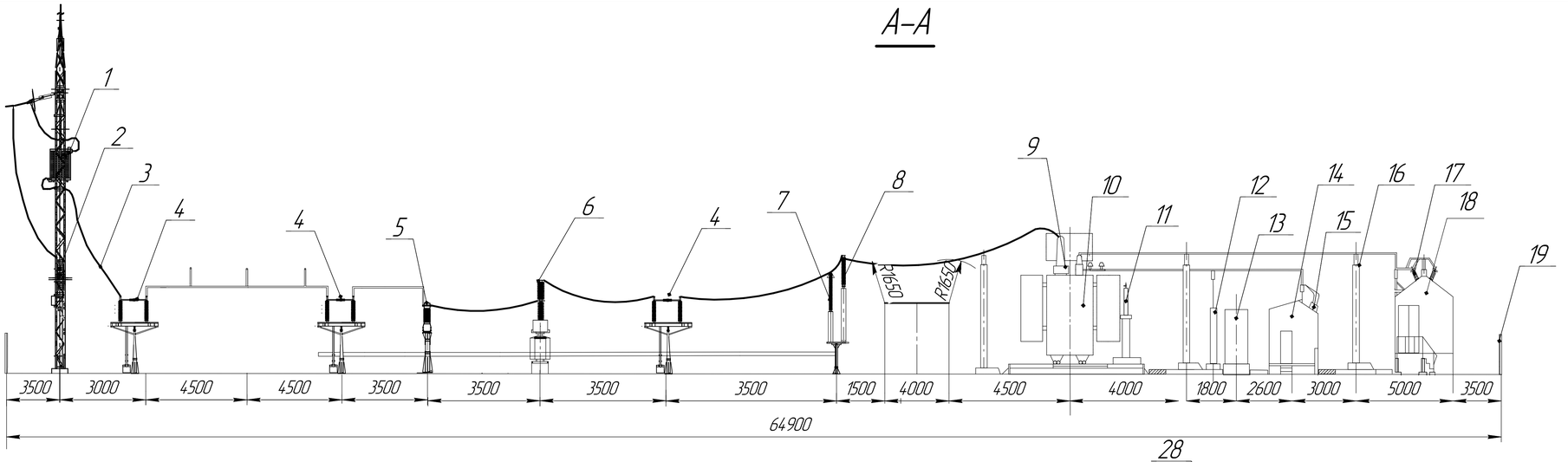
Взам. инв. №

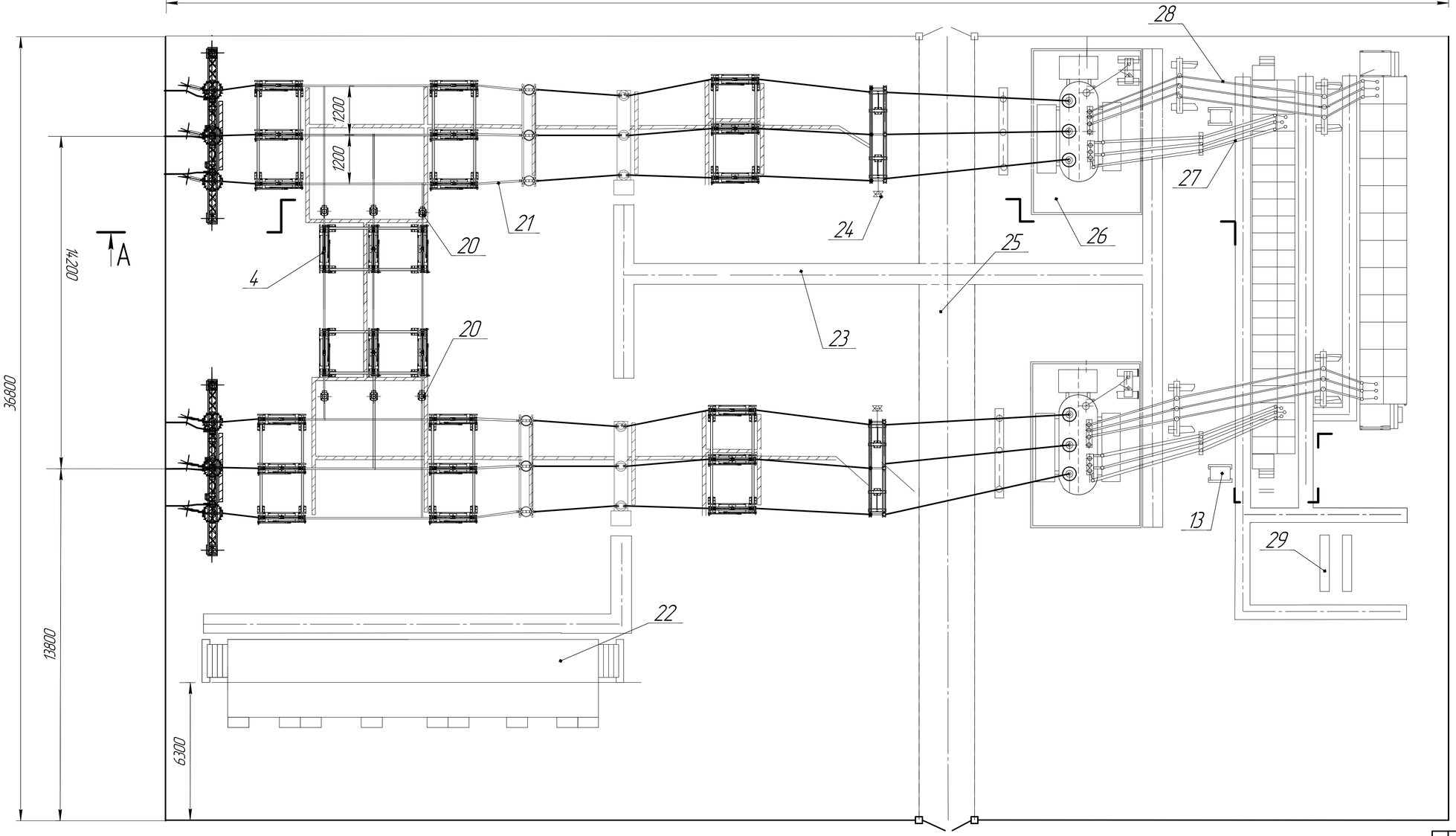
Подп. и дата

Инв. № подл.

КР-13.03.02 ЭС-3-16.2020

А–А





Поз. Обозн.	Наименование.
1	ВЧ-заградитель
2	Конденсатор связи
3	Гибкая ошиновка 110кВ
4	Блок разъединителя
5	Трансформатор тока
6	Блок выключателя
7	Ограничитель перенапряжения
8	Опорный изолятор 110кВ
9	Встроенный трансформатор тока
10	Трансформатор силовой
11	Блок ЗОН-110 и ОПН
12	Опорный изолятор 10кВ
13	Трансформатор собственных нужд
14	КРУ 10кВ
15	Проходной изолятор 10кВ
16	Опорный изолятор 35кВ
17	Проходной изолятор 35кВ
18	КРУ 35 кВ
19	Ограждение
20	Трансформатор напряжения
21	Жесткая ошиновка 110кВ
22	Пункт управления
23	Наземные кабельные коммуникации
24	Освещение
25	Дорога
26	Фундамент сил-го трансф.
27	Жесткая ошиновка 10 кВ
28	Жесткая ошиновка 35 кВ
29	Компенсирующие устройства

Перв. примен.

Справ. №

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Нусамиев Н.Ш.		13.05.20
Пров.		Гарифуллин М.Ш.		13.05.20
Т.контр.				
Н.контр.		Гарифуллин М.Ш.		13.05.20
Утв.		Максимов В.В.		13.05.20

КР-13.03.02. ЭС-3-16.2020

Основы проектирования подстанций, линий электропередачи с учетом нормативных требований

План и разрез подстанции №1

Лит.	Масса	Масштаб
Лист	Листов 1	

КГЭУ
Каф. ЭСиС

Копировал

Формат А1