



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:

Яхин Шамиль Рустамович

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: ст.преп.

(должность)

(подпись)

Гиззатова И.Д.

(И.О. Фамилия)

доцент

(должность)

(подпись)

Муратаева Г.А.

(И.О. Фамилия)

доцент

(должность)

(подпись)

Сабитов А.Х.

(И.О. Фамилия)

Казань, 2020г.



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
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 Яхин Шамиль Рустамович, 4 курс, группа ЭС-3-16
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-3-16
Группы Ш.Р.Яхин
(личная подпись)(инициалы, фамилия)

Зав.кафедрой К.Т.Н., доцент Максимов В.В.
должность, ученое звание, ученая степень подпись фамилия

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	Error! Bookmark not defined.
1. Исходные данные	5
2. Выбор компенсирующих устройств и трансформаторов	5
3. Расчет токов трехфазного короткого замыкания	6
4. Выбор оборудования на стороне ВН	7
5. Выбор оборудования на стороне СН	18
6. Выбор оборудования на стороне НН	32
6.1. Выбор трансформатора собственных нужд	44
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	477

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 электрическую 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 $I_{кз} = 39$ кА
3. $R_c = 0,03X_c$
4. На стороне СН:

$P_{СН} = 21$ МВт; $\cos\phi = 0,94$. Количество отходящих линий – 10.

5. На стороне НН:

$P_{НН} = 9$ МВт; $\cos\phi = 0,83$. Количество отходящих линий – 20.

6. Сечение провода (Al), мм² / Длина линии, км:

$$A-2': \frac{240}{15}; 2'-2: \frac{240}{11}; 2'-1: \frac{240}{13}.$$

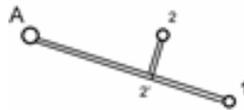


Рис. 1. Скелетная схема.

2. Выбор компенсирующих устройств и трансформаторов

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

$$Q_{КУ} = P_{НН}(tg\phi_{НН} - tg\phi_{э}) = 9 \cdot (0,67 - 0,3) = 3,33 \text{ МВар.}$$

Принимаем к установке 2×УКРМ-10-1700 У1.

Найдем реактивную мощность на НН с учетом КУ:

$$Q'_{НН} = P_{НН} \cdot tg\phi_{НН} - Q_{КУ} = 9 \cdot 0,67 - 3,33 = 2,7 \text{ МВар.}$$

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

$$P_H = P_{СН} + P_{НН} = 21 + 9 = 30 \text{ МВт.}$$

$$Q_H = P_{СН} \cdot tg\phi_{СН} + Q'_{НН} = 21 \cdot 0,36 + 2,7 = 10,26 \text{ МВар.}$$

$$S_H = \sqrt{P_H^2 + Q_H^2} = \sqrt{30^2 + 10,26^2} = 31,7 \text{ МВА.}$$

Расчетная мощность одного трансформатора:

$$S_{\text{ТР}} = \frac{S_H}{1,1} = \frac{31,7}{1,1} = 28,82 \text{ МВА.}$$

Выбираем 2×ТДТН-40000/110-У1

Каталожные данные трансформатора:

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

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

$R_{\text{ТВ}}=R_{\text{ТС}}=R_{\text{ТН}}=0,8 \text{ Ом}$;

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

3. Расчет токов трехфазного короткого замыкания

На рис.2 представлена расчетная схема замещения

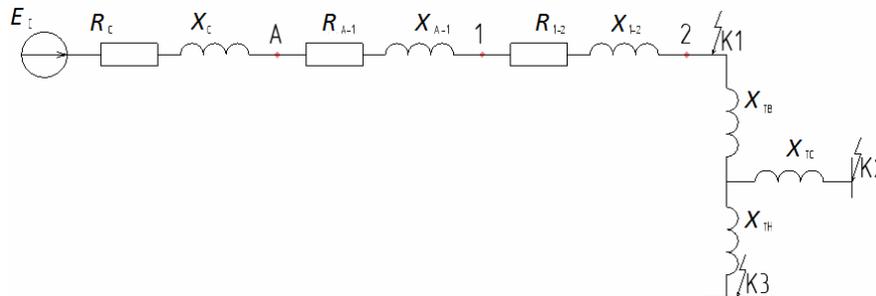


Рис.2. Схема замещения

Энергосистема:

$$Z_c = \frac{U_{\text{ср,ВН}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{кЗ}}} = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 39} = 1,7024 \text{ Ом.}$$

$$X_c = \frac{Z_c}{\sqrt{1,0009}} = \frac{1,7024}{\sqrt{1,0009}} = 1,7017 \text{ Ом.}$$

$$R_c = 0,03 \cdot X_c = 0,03 \cdot 1,7017 = 0,051 \text{ Ом.}$$

Линия:

$$R_{\text{ЛА-2}'} = r_{0\text{A-2}'} \cdot L_{\text{A-2}'} = 0,118 \cdot 15 = 1,77 \text{ Ом.}$$

$$X_{\text{ЛА-2}'} = x_{0\text{A-2}'} \cdot L_{\text{A-2}'} = 0,405 \cdot 15 = 6,075 \text{ Ом.}$$

$$R_{\text{Л2}'-2} = r_{02'-2} \cdot L_{2'-2} = 0,118 \cdot 11 = 1,298 \text{ Ом.}$$

$$X_{\text{Л2}'-2} = x_{02'-2} \cdot L_{2'-2} = 0,405 \cdot 11 = 4,455 \text{ Ом.}$$

$$R_{\text{Л2}'-1} = r_{02'-1} \cdot L_{2'-1} = 0,118 \cdot 13 = 1,534 \text{ Ом.}$$

$$X_{\text{Л2}'-1} = x_{02'-1} \cdot L_{2'-1} = 0,405 \cdot 13 = 5,265 \text{ Ом.}$$

Трансформатор:

Определим ток короткого замыкания в точке К1:

$$X_1 = X_{\text{Сис}} + X_{\text{A-2}'} + X_{2'-1} = 1,7024 + 6,075 + 5,265 = 13,6284 \text{ Ом.}$$

$$R_1 = R_{\text{Сис}} + R_{\text{A-2}'} + R_{2'-1} = 0,051 + 1,77 + 1,534 = 3,3727 \text{ Ом.}$$

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{13,6284^2 + 3,3727^2} = 14,0395 \text{ Ом.}$$

$$I_{\text{ПО,ВН}} = \frac{U_{\text{ср,ВН}}}{\sqrt{3} \cdot (Z_{\text{Э1}})} = \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot (14,0395)} = 4729,177 \text{ А.}$$

$$T_a = \frac{X_1}{\omega \cdot R_1} = \frac{13,6284}{314 \cdot (3,3727)} = 0,01287 \text{ с.}$$

Определим ток короткого замыкания в точке К2:

$$X_2 = X_1 + X_{\text{ТВ}} + X_{\text{ТС}} = 13,6284 + 35,5 + 0 = 49,1284 \text{ Ом}$$

$$R_2 = R_1 + R_{\text{ТВ}} + R_{\text{ТС}} = 3,3727 + 0,8 + 0,8 = 4,9727 \text{ Ом}$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} = \sqrt{4,9727^2 + 49,1284^2} = 49,3794 \text{ Ом.}$$

$$I'_{\text{ПО,ВН}} = \frac{U_{\text{ср,ВН}}}{\sqrt{3} \cdot (Z_{\text{Э2}})} = \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot (49,3794)} = 1344,594 \text{ А.}$$

$$I_{\text{ПО,ВН}} = I'_{\text{ПО,ВН}} \cdot \frac{115}{38,5} = 4016,32 \text{ А.}$$

$$T_a = \frac{X_2}{\omega \cdot R_2} = \frac{49,1284}{314 \cdot (4,9727)} = 0,0315 \text{ с.}$$

Определим ток короткого замыкания в точке К3:

$$X_3 = X_1 + X_{\text{ТВ}} + X_{\text{ТН}} = 13,6284 + 35,5 + 22,3 = 71,4284 \text{ Ом}$$

$$R_3 = R_1 + R_{\text{ТВ}} + R_{\text{ТН}} = 3,3727 + 0,8 + 0,8 = 4,9727 \text{ Ом}$$

$$Z_3 = \sqrt{R_3^2 + X_3^2} = \sqrt{4,9727^2 + 71,4284^2} = 71,601 \text{ Ом.}$$

$$I'_{\text{ПО,ВН}} = \frac{U_{\text{ср,ВН}}}{\sqrt{3} \cdot (Z_{\text{Э2}})} = \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot (71,601)} = 927,292 \text{ А.}$$

$$I_{\text{ПО,ВН}} = I'_{\text{ПО,ВН}} \cdot \frac{115}{11} = 9694,4137 \text{ А.}$$

$$T_a = \frac{X_3}{\omega \cdot R_3} = \frac{71,4284}{314 \cdot (4,9727)} = 0,04575 \text{ с.}$$

Таблица 1. Сводная таблица токов КЗ

Сторона	$U_{\text{НОМ,кВ}}$	$U_{\text{ср,кВ}}$	$I_{\text{ПО,кА}}$
ВН	110	115	4729,177
СН	35	38,5	4016,32
НН	10	11	9694,4137

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 $I_{\text{ПО}} = 6827,36 \text{ A}$.

Выбор выключателя производится по следующим параметрам:

1. По напряжению установки: $U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}}$.
2. По длительному току: $I_{\text{max}} \leq I_{\text{ном}}$.

Напряжение в цепи выключателя:

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

Максимальный ток в цепи выключателя:

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

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

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

$$I_{\text{max}} = 209,946\text{A} \leq I_{\text{ном}} = 2500\text{A}.$$

Проверим выбранный выключатель по следующим условиям:

1. Возможность отключения апериодической составляющей тока КЗ.:

$$i_{a,\tau} \leq i_{a,\text{ном}}$$

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

Апериодическая составляющая тока КЗ:

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ПО}} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 4729,177 \cdot e^{\frac{-0,06}{0,01287}} = 63,186 \text{ A},$$

$$\tau = t_{\text{з,мин}} + t_{\text{с.в}} = 0,01 + 0,05 = 0,06 \text{ с},$$

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

Номинальное допустимое значение апериодической составляющей выключаемого тока:

$$i_{a,\text{ном}} = (\sqrt{2} \cdot \beta_{\text{ном}} \cdot I_{\text{откл.ном}}) / 100 = (\sqrt{2} \cdot 30 \cdot 31,5) / 100 = 13,4\text{кА},$$

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

$$i_{a.T} = 63,186 \text{ A} \leq i_{a.\text{ном}} = 13,4 \text{ kA} - \text{условие выполняется.}$$

2. На электродинамическую стойкость:

$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{дин}}$, 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:

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ПО}} \cdot \left(1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}} \right) = \sqrt{2} \cdot 4729,177 \cdot \left(1 + e^{-\frac{0,01}{0,01287}} \right) = 9763,125 \text{ A.}$$

$$i_{\text{уд}} = 9763,125 \text{ A} \leq i_{\text{дин}} = 80 \text{ kA} - \text{условие выполняется.}$$

3. На термическую стойкость:

$$I_T^2 \cdot t_T \geq B_K,$$

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

Тепловой импульс тока КЗ (расчетный):

$$B_K = I_{\text{ПО}}^2 \cdot (t_{\text{з.мин}} + t_{\text{выкл}} + T_a + 3 \cdot \Delta t)$$

$$= 4729,177^2 \cdot (0,01 + 0,075 + 0,01287 + 3 \cdot 0,5)$$

$$= 35,737 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{c.}$$

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

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

$$I_T^2 \cdot t_T = 2977 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{c} \geq B_K = 35,737 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{c} \quad - \quad \text{условие выполняется.}$$

Выбор разъединителей производится по следующим параметрам:

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

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

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

$$I_{\text{max}} = 209,946 \text{ A} \leq I_{\text{ном}} = 1000 \text{ A.}$$

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:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot I_{ПО} \cdot \left(1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}\right) = \sqrt{2} \cdot 4729,177 \cdot \left(1 + e^{-\frac{0,01}{0,01287}}\right) = 9763,125 \text{ А.}$$

$$i_{уд} = 9763,125 \text{ А} \leq i_{дин} = 80 \text{ кА} - \text{условие выполняется.}$$

2. На термическую стойкость:

$$I_T^2 \cdot t_T \geq B_K,$$

Тепловой импульс тока КЗ (расчетный):

$$\begin{aligned} B_K &= I_{ПО}^2 \cdot (t_{з.мин} + t_{выкл} + T_a + 3 \cdot \Delta t) \\ &= 4729,177^2 \cdot (0,01 + 0,075 + 0,01287 + 3 \cdot 0,5) \\ &= 35,737 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с.} \end{aligned}$$

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

$$I_T^2 \cdot t_T = 2977 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с} \geq B_K = 35,737 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с} \quad - \quad \text{условие}$$

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:

$$U_{уст} \leq U_{ном.}$$

2. По длительному току:

$$\begin{aligned} I_{max,ТТ} &\leq I_{ном.} \\ I_{max,ТТ} &= \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{ВН}}, \end{aligned}$$

где S_H - потребляемая мощность из системы, т.е. с учетом установки КУ.

Выбранные трансформаторы проверяются по следующим условиям:

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

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

3. На вторичную нагрузку: $Z_2 \leq Z_{2ном.}$

В качестве трансформатора тока наружной установки был выбран ТОГФ-110 УХЛ, с номинальным током $I_{ном} = 300 \text{ А}$.

Таблица 2

Расчетные данные	Каталожные данные
$U_{уст} = 110 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 110 \text{ кВ}$

$I_{max,TT} = \frac{31,7 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 110} = 166,38 \text{ A}$	$I_{ном} = 300 \text{ A}$
$i_{уд} = 9763,125 \text{ A}$	$i_{\leftrightarrow \text{дин}} = 63 \text{ кА}$
$B_k = 35,737 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$	$I_t^2 \cdot t_t = 13^2 \cdot 3 = 507 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$

В качестве трансформатора тока, встроенного в силовой трансформатор, выбран трансформатор тока типа ТВТ-110-I -300/5:

Таблица 3

Расчетные данные	Каталожные данные
$U_{уст} = 110 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 110 \text{ кВ}$
$I_{max,TT} = \frac{31,7 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 110} = 166,38 \text{ A}$	$I_{ном} = 300 \text{ A}$
$B_k = 35,737 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$	$I_t^2 \cdot t_t = (25 \cdot 300)^2 \cdot 3 = 168,75 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$

Таблица 4

Прибор	Тип	Нагрузка фаз, ВА		
		А	В	С
Амперметр	Э-335	0,5	0,5	0,5
Ваттметр	Д-365	0,5	-	0,5
Варметр	Д-365	0,5	-	0,5
Счетчик активной и реактивной энергии	Ртутный-230ART-00 P(Q)R(C)SIDN	0,1	-	0,1
Итого		1,6	0,5	1,6

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

$$r_2 = r_{приб} + r_{пр} + r_k.$$

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 $r_k = 0,1 \text{ Ом}$.

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

$$r_{\text{приб}} + r_{\text{пр}} + r_k \leq z_{2 \text{ ном}}.$$

Откуда,

$$r_{\text{пр}} \leq z_{2 \text{ ном}} - r_{\text{приб}} - r_k.$$

Найдем $z_{2 \text{ ном}}$:

$$z_{2 \text{ ном}} = \frac{S_{\text{вт}}}{I_2^2} = \frac{30}{5^2} = 1,2 \text{ Ом},$$

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

Сопротивление соединительных проводов:

$$r_{\text{пр}} = z_{2 \text{ ном}} - r_{\text{приб}} - r_k = 1,2 - 0,064 - 0,1 = 1,036 \text{ Ом}.$$

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

$$q = \frac{\rho l_{\text{расч}}}{r_{\text{пр}}} = \frac{0,0283 \cdot 80}{1,036} = 2,185 \text{ мм}^2.$$

где ρ – удельное сопротивление материала провода. Провода с медными жилами ($\rho = 0,0175 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$) 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 ($\rho = 0,0283 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$); $l_{\text{расч}}$ – расчетная длина, зависящая от схемы соединения трансформаторов тока, в данном случае 80 м (для подстанций длины снижаются на 15 – 20 %).

По условию прочности сечение не должно быть меньше 2,5 мм² для алюминиевых жил и 1,5 мм² для медных жил (ПУЭ, п. 3.4.4). Сечение больше 6 мм² обычно не применяется.

Предварительно принимаем кабель КВВГ с алюминиевыми жилами сечением 4 мм² со следующими параметрами:

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

Определим сопротивление приборов:

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

Найдем z_2 :

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

$$z_2 = 0,796 \text{ Ом} \leq z_{2 \text{ ном}} = 1,2 \text{ Ом} - \text{условие выполняется.}$$

Принимаем к установке контрольный кабель КВВГ с алюминиевыми жилами сечением жил 4 мм².

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

Трансформаторы напряжения выбираются:

1. по напряжению установки: $U_{уст} \leq U_{ном}$.
2. по вторичной нагрузке: $S_{2\Sigma} \leq S_{ном}$.

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 регистр.	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	Меркурий-230ART-00 P(Q)R(C)SID N	-	-	-	7,5
Фиксатор импульсного действия	ФИП	3	1	3	9
Итого					54,5

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

Мощность нагрузки на вторичной обмотке трансформатора напряжения:

$$S_{2\Sigma} = 54,5 \text{ ВА} < 250 \text{ ВА} - \text{условие выполняется.}$$

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 УХЛ;

- фильтр присоединения: ФП-82/40-1000 У1;

- конденсатор связи: СМПВ-110/√3-6,4 У1.

Выбор изоляторов:

- изоляторы наружной установки 110 кВ опорного типа ОСК10–110–А–2УХЛ1;

- изоляторы наружной установки 110 кВ подвешного 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:

$$f = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i_{уд}^2}{a} = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot \frac{9763,125^2}{1} = 16,51 \text{ Н/м,}$$

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

Изгибающий момент:

$$M_{max} = \frac{f \cdot l^2}{10} = \frac{16,51 \cdot 9^2}{10} = 133,73 \text{ Н} \cdot \text{м,}$$

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:

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

Найдем сечение q выбранной шины:

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

Момент сопротивления шины относительно оси, перпендикулярной действию усилия:

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

Напряжение в материале шины, возникающее при воздействии изгибающего момента:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W} = \frac{133,73}{17,278} = 7,74 \text{ МПа.}$$

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

$\sigma_{доп} = 247 \text{ МПа.}$

$247 \text{ МПа} \geq 5,791 \text{ МПа}$ – условие выполняется.

2. Проверка по нагреву (допустимому току).

Условие проверки:

$$I_{доп} \geq I_{max},$$

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

$$I_{max} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{ВН}} = \frac{31,7 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 110} = 166,382 \text{ А,}$$

где S_H – потребляемая мощность из системы, т.е. с учетом установки КУ.

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

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

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

Для неизолированных проводов и окрашенных шин принято:

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

Допустимый ток:

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

$1662,6 \text{ А} \geq 166,382 \text{ А}$ – 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).

$$q_{min} = \frac{\sqrt{B_K}}{C_T} = \frac{\sqrt{35,737 \cdot 10^6}}{51} = 117,21 \text{ мм}^2$$

$117 \text{ мм}^2 \leq 954,56 \text{ мм}^2$ – условие выполняется.

4. Проверка на электродинамическую стойкость с учетом механических колебаний.

Условие проверки:

$$J = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64} = \frac{3,14 \cdot (8^4 - 7,2^4)}{64} = 69,11 \text{ см}^4,$$

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 $80 \times 4 \text{ мм}$ 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.

$$I_{max} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{ВН}} = \frac{31,7 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 110} = 166,382 \text{ А},$$

где S_H – потребляемая мощность из системы, т.е. с учетом установки КУ.

$$q_s = \frac{I_{max}}{j_s} = \frac{166,382}{1,1} = 150,91 \text{ мм}^2,$$

где j_s – экономическая плотность тока, А/мм^2 (табл. 1.3.36 ПУЭ).

Сечение округляем до ближайшего стандартного – 150 мм^2 . Применяем провод АС-150/29.

2. Проверка сечения по допустимому току.

Условие проверки:

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{max}},$$

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

$$I_{\text{max}} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ВН}}} = \frac{31,7 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 110} = 166,382 \text{ A},$$

где S_H – потребляемая мощность из системы, т.е. с учетом установки КУ.

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

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

Для АС-150/29 по табл. 1.3.29 ПУЭ: $I_{\text{доп.ном}} = 450 \text{ A}$

Для неизолированных проводов и окрашенных шин принято:

$$\vartheta_{\text{доп}} = 70^\circ\text{C}, \vartheta_{\text{о. доп}} = 25^\circ\text{C}.$$

Допустимый ток:

$$I_{\text{доп}} = 450 \cdot \sqrt{\frac{70 - 40}{70 - 25}} = 367,42 \text{ A};$$

$367,42 \text{ A} \geq 166,382 \text{ A}$ – условие выполняется.

3. Проверка шин на термическую стойкость.

Условие проверки:

$$q \geq q_{\text{min}},$$

где $q_{\text{min}} = \sqrt{B_K}/C_T$ – 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 .

$$q_{\text{min}} = \frac{\sqrt{B_K}}{C_T} = \frac{\sqrt{35,737 \cdot 10^6}}{76} = 78,66 \text{ мм}^2;$$

$q_{\text{min}} = 78,66 \text{ мм}^2 \leq q = 150 \text{ мм}^2$ – условие выполняется.

4. На электродинамическое действие тока КЗ проверяют гибкие шины РУ при $I_{\text{КЗ}} \geq 20 \text{ кА}$. Так как ток $I_{\text{п0}}$ в точке К1 меньше 20 кА, то проверку не делаем.

5. Проверка по условиям короны.

Условие отсутствия короны:

$$1,07 \cdot E \leq 0,9 \cdot E_0.$$

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-150/29 $r_0 = 0,855$ см.

Напряженность электрического поля около поверхности нерасщепленного провода:

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

где U – линейное напряжение, кВ; D_{cp} – среднее геометрическое расстояние между проводами фаз, см.

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

Проверяем условие:

$$1,07 \cdot 21 \leq 0,9 \cdot 32,88;$$

$22,48 \leq 29,592$ – 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 НН

На стороне 35 кВ подстанции принимаем к установке комплектное распределительное устройство КРУ 35кВ.

Выбор выключателя на стороне СН.

Для выбора выключателя на стороне СН расчетной точкой является точка К2 и ток $I_{по} = 9694,4137$ А.

Выбор выключателя производится по следующим параметрам:

1. По напряжению установки: $U_{уст} \leq U_{ном}$.
2. По длительному току: $I_{max} \leq I_{ном}$.

Выключатель ячейки ввода.

Максимальный ток в цепи выключателя:

$$I_{\max} = \frac{S_{\max}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{CH}}} = \frac{40 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 35} = 2309,4 \text{ А,}$$

где S_{\max} - мощность трансформатора.

По каталогу выбираем ВРС-10 на номинальный ток 2500А.

Напряжение в цепи выключателя:

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

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

Проверим выбранный выключатель по следующим условиям:

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

$$i_{a,\tau} \leq i_{a,\text{ном}},$$

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

Апериодическая составляющая тока КЗ:

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{П0}} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 9694,4137 \cdot e^{\frac{-0,06}{0,0293}} = 1768,87 \text{ А,}$$

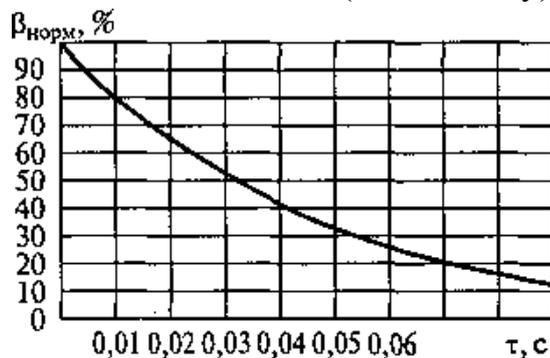
$$\tau = t_{\text{з,мин}} + t_{\text{с.в}} = 0,01 + 0,05 = 0,06 \text{ с,}$$

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

Номинальное допустимое значение апериодической составляющей выключаемого тока:

$$i_{a,\text{ном}} = (\sqrt{2} \cdot \beta_{\text{ном}} \cdot I_{\text{откл.ном}}) / 100 = (\sqrt{2} \cdot 26 \cdot 20) / 100 = 7,35 \text{ кА,}$$

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



Нормированное содержание аperiodической составляющей.

$$i_{a.т} = 1,768 \text{ кА} \leq i_{a.ном} = 7,35 \text{ кА} \text{ — условие выполняется.}$$

2. На электродинамическую стойкость:

$$i_{уд} \leq i_{дин},$$

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

Ударный ток КЗ:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot I_{П0} \cdot (1 + e^{-0,01/T_a}) = \sqrt{2} \cdot 9694,4137 \cdot (1 + e^{-0,01/0,0293}) = 23455,67 \text{ кА},$$

$$i_{уд} = 23455 \text{ А} \leq i_{дин} = 52000 \text{ А} \text{ — условие выполняется.}$$

3. На термическую стойкость:

$$I_T^2 \cdot t_T \geq B_K,$$

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

Тепловой импульс тока КЗ (расчетный):

$$B_K = I_{П0}^2 \cdot (t_{р3А} + t_{выкл} + T_a + 2 \cdot \Delta t) = 9694,41^2 \cdot (0,01 + 0,065 + 0,0293 + 2 \cdot 0,5) = 103,8 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с},$$

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

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

$$I_T^2 \cdot t_T = 1200 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с} \geq B_K = 103,8 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с} \text{ — условие выполняется.}$$

Секционный выключатель.

Максимальный ток в цепи выключателя:

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

где $S_{max,раб}$ — мощность трансформатора.

По каталогу выбираем ВРС-10 на номинальный ток 1250 А.

Напряжение в цепи выключателя:

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

$$I_{max} = 1154,7 \leq I_{ном} = 1250 \text{ А.}$$

Проверим выбранный выключатель по следующим условиям:

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

$$i_{a.т} \leq i_{a.ном},$$

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

Аperiodическая составляющая тока КЗ:

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{П0} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 9694,41 \cdot e^{\frac{-0,06}{0,0293}} = 1768,81 \text{ А,}$$

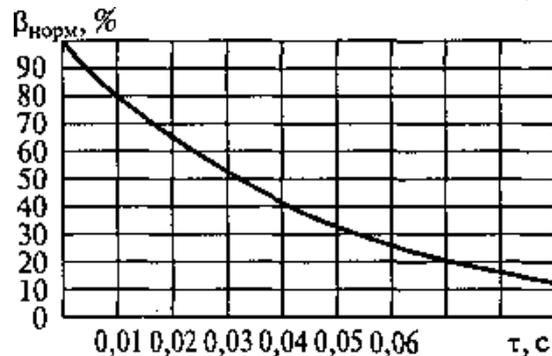
$$\tau = t_{з,мин} + t_{с.в} = 0,01 + 0,05 = 0,06 \text{ с,}$$

где T_a – постоянная времени цепи КЗ, учитывает влияние аperiodической 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, $t_{з,мин} = 0,01 \text{ с}$ – минимальное время действия релейной защиты; $t_{с.в}$ – собственное время отключения выключателя.

Номинальное допустимое значение аperiodической составляющей выключаемого тока:

$$i_{a,ном} = (\sqrt{2} \cdot \beta_{ном} \cdot I_{откл,ном}) / 100 = (\sqrt{2} \cdot 26 \cdot 20) / 100 = 7,35 \text{ кА,}$$

где $\beta_{ном}$ – нормированное процентное содержание аperiodической составляющей в отключающем токе (по каталогу или на рисунке ниже); $I_{откл,ном}$ – номинальный ток отключения (по каталогу).



Нормированное содержание аperiodической составляющей.

$$i_{a,\tau} = 1,77 \text{ кА} \leq i_{a,ном} = 7,35 \text{ кА} \text{ – условие выполняется.}$$

2. На электродинамическую стойкость:

$$i_{уд} \leq i_{дин},$$

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

Ударный ток КЗ:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot I_{П0} \cdot (1 + e^{-0,01/T_a}) = \sqrt{2} \cdot 9694,41 \cdot (1 + e^{-0,01/0,0293}) = 23456,1 \text{ А,}$$

$$i_{уд} = 23456,1 \text{ А} \leq i_{дин} = 52 \text{ кА} \text{ - условие выполняется.}$$

3. На термическую стойкость:

$$I_T^2 \cdot t_T \geq B_K,$$

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

Тепловой импульс тока КЗ (расчетный):

$$B_K = I_{\Pi 0}^2 \cdot (t_{\text{P3A}} + t_{\text{выкл}} + T_a + \Delta t) = 9694,41^2 \cdot (0,01 + 0,065 + 0,0293 + 0,5) = 56,793 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{c},$$

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, (для секционного выключателя принимают Δt).

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

$$I_T^2 \cdot t_T = 1200 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{c} \geq B_K = 56,793 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{c} \text{ – условие выполняется.}$$

Выключатель отходящих линий.

Максимальный ток в цепи выключателя:

$$I_{\text{MAX, раб}} = \frac{\sqrt{P_{\text{СН}}^2 + Q_{\text{СН}}^2}}{N_{\text{отх}} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{СН}}} = \frac{\sqrt{9^2 + (9 \cdot 0,67)^2} \cdot 10^3}{20 \cdot \sqrt{3} \cdot 10} = 31,27 \text{ A}$$

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

По каталогу выбираем ВРС-10 на номинальный ток 630А.

Напряжение в цепи выключателя:

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

$$I_{\text{max}} = 31,27 \text{ A} \leq I_{\text{ном}} = 630 \text{ A.}$$

Проверим выбранный выключатель по следующим условиям:

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

$$i_{a,\tau} \leq i_{a,\text{ном}},$$

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:

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{\Pi 0} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 9694,41 \cdot e^{\frac{-0,06}{0,0293}} = 1768,87 \text{ A},$$

$$\tau = t_{\text{з,мин}} + t_{\text{с.в}} = 0,01 + 0,05 = 0,06 \text{ с},$$

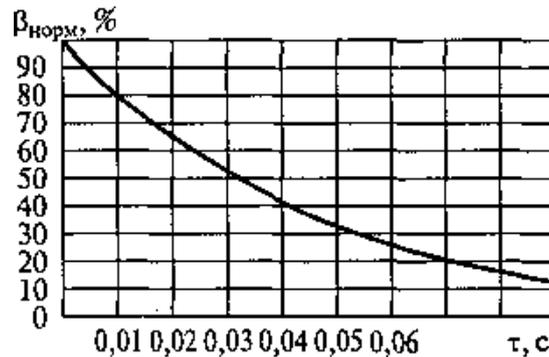
где T_a – постоянная времени цепи КЗ, учитывает влияние апериодической составляющей в токе КЗ; $I_{\Pi 0}$ – начальное значение периодической составляющей тока КЗ в цепи выключателя; τ – наименьшее время от начала КЗ до момента расхождения дугогасительных контактов, $t_{\text{з,мин}} = 0,01$ с –

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

Номинальное допустимое значение аperiodической составляющей выключаемого тока:

$$i_{a.ном} = (\sqrt{2} \cdot \beta_{ном} \cdot I_{откл.ном}) / 100 = (\sqrt{2} \cdot 26 \cdot 20) / 100 = 7,35 \text{ кА},$$

где $\beta_{ном}$ – нормированное процентное содержание аperiodической составляющей в отключающем токе (по каталогу или на рисунке ниже); $I_{откл.ном}$ – номинальный ток отключения (по каталогу).



Нормированное содержание аperiodической составляющей.

$$i_{a.т} = 1,77 \text{ кА} \leq i_{a.ном} = 7,35 \text{ кА} \text{ – условие выполняется.}$$

2. На электродинамическую стойкость:

$$i_{уд} \leq i_{дин},$$

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

Ударный ток КЗ:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot I_{по} \cdot (1 + e^{-0,01/T_a}) = \sqrt{2} \cdot 9694,41 \cdot (1 + e^{-0,01/0,0293}) = 23456 \text{ А},$$

$$i_{уд} = 23456 \text{ А} \leq i_{дин} = 52 \text{ кА} \text{ - условие выполняется.}$$

3. На термическую стойкость:

$$I_T^2 \cdot t_T \geq B_K,$$

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

Тепловой импульс тока КЗ (расчетный):

$$B_K = I_{по}^2 \cdot (t_{рза} + t_{выкл} + T_a) = 9694,41^2 \cdot (0,01 + 0,065 + 0,0293) = 9,802 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с},$$

где $t_{выкл}$ – полное время отключения выключателя (по каталогу) $t_{выкл} = 0,065 \text{ с}$).

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

$$I_T^2 \cdot t_T = 1200 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с} \geq B_K = 9,802 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с} \text{ – условие выполняется.}$$

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

Трансформаторы тока выбираются:

1. По напряжению установки: $U_{уст} \leq U_{ном}$;
2. По длительному току: $I_{МАХ,ТТ} \leq I_{ном}$.

Выбранные трансформаторы проверяются по следующим условиям:

1. На электродинамическую стойкость: $i_y \leq i_{пр.с}$;
2. На термическую стойкость: $B_K \leq I_t^2 \cdot t_t$;
3. На вторичную нагрузку: $z_2 \leq z_{2 ном}$.

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

Ячейка ввода.

Максимальный ток:

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

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

Таблица 6

Расчетные данные	Каталожные данные
$U_{уст} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$
$I_{max,ТТ} = \frac{\sqrt{P_{НН}^2 + Q_{НН}^2}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} =$ $= \frac{\sqrt{9^2 + 2,7^2 \cdot 10^3}}{\sqrt{3} \cdot 10} = 542,5 \text{ А}$	$I_{ном} = 600 \text{ А}$
$i_{уд} = 23456 \text{ А}$	$i_{дин} = 102 \text{ кА}$
$B_K = 103,8 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$	$I_t^2 \cdot t_t = 1600 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$

Ячейка секционного выключателя.

Максимальный ток:

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

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

Таблица 7

Расчетные данные	Каталожные данные
$U_{\text{уст}} = 10 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$
$I_{\text{max, ГТ}} = \frac{\sqrt{P_{\text{СН}}^2 + Q_{\text{СН}}^2}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} =$ $= \frac{\sqrt{9^2 + 2,7^2 \cdot 10^3}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10} = 271,25 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 300 \text{ А}$
$i_{\text{уд}} = 23456 \text{ А}$	$i_{\text{дин}} = 81 \text{ кА}$
$B_{\kappa} = 56,793 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$	$I_t^2 \cdot t_t = 992 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$

Ячейка отходящих линий.

Максимальный ток:

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

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

Таблица 8

Расчетные данные	Каталожные данные
$U_{\text{уст}} = 10 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$
$I_{\text{max, ГТ}} = \frac{\sqrt{P_{\text{СН}}^2 + Q_{\text{СН}}^2}}{N_{\text{отх}} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} =$ $= \frac{\sqrt{9^2 + (9 \cdot 0,67)^2 \cdot 10^3}}{20 \cdot \sqrt{3} \cdot 10} = 31,27 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 100 \text{ А}$
$i_{\text{уд}} = 23,456 \text{ А}$	$i_{\text{дин}} = 25,5 \text{ кА}$
$B_{\kappa} = 9,802 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$	$I_t^2 \cdot t_t = 100 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$

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

Таблица 9

Прибор	Тип	Нагрузка фаз, ВА		
		А	В	С

Амперметр	Э-335	0,5	0,5	0,5
Ваттметр	Д-365	0,5	-	0,5
Варметр	Д-365	0,5	-	0,5
Счетчик активной и реактивной энергии	Меркурий230ART-00 P(Q)R(C)SIDN	0,1	-	0,1
Итого		1,6	0,5	1,6

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 $r_{\text{к}} = 0,1 \text{ Ом}$.

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

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

Откуда,

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

Найдем $z_{2 \text{ ном}}$:

$$z_{2 \text{ ном}} = \frac{S_{\text{вт}}}{I_2^2} = \frac{25}{5^2} = 1 \text{ Ом},$$

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

Сопротивление соединительных проводов:

$$r_{\text{пр}} = z_{2 \text{ ном}} - r_{\text{приб}} - r_{\text{к}} = 1 - 0,064 - 0,1 = 0,836 \text{ Ом};$$

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

$$q = \frac{\rho l_{\text{расч}}}{r_{\text{пр}}} = \frac{0,0283 \cdot 80}{0,836} = 2,71 \text{ мм}^2.$$

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, в данном случае 80 м (для подстанций длины снижаются на 15 – 20 %).

По условию прочности сечение не должно быть меньше 2,5 мм² для алюминиевых жил и 1,5 мм² для медных жил (ПУЭ, п. 3.4.4). Сечение больше 6 мм² обычно не применяется.

Предварительно принимаем кабель КВВГ с алюминиевыми жилами сечением 4 мм² со следующими параметрами:

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

Определим сопротивление приборов:

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

Найдем z_2 :

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

$$z_2 = 0,796 \text{ Ом} \leq z_{2,\text{НОМ}} = 1 \text{ Ом} \text{ – условие выполняется.}$$

Принимаем к установке контрольный кабель КВВГ с алюминиевыми жилами сечением жил 4 мм².

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

Трансформаторы напряжения выбираются:

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

2. По вторичной нагрузке: $S_{2\Sigma} \leq S_{\text{НОМ}}$.

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 регистр.	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 00 P(Q)R(C) SIDN	-	-	-	7,5
Фиксатор импульсного действия	ФИП	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 мм² из алюминиевого сплава 1915Т.

1. Механический расчет однополосных шин.

Наибольшее удельное усилие при трехфазном КЗ:

$$f = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i_{уд}^2}{a} = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot \frac{23456^2}{0,22} = 433,16 \text{ Н/м,}$$

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

Изгибающий момент:

$$M_{max} = \frac{f \cdot l^2}{10} = \frac{433,16 \cdot 3^2}{10} = 389,84 \text{ Н} \cdot \text{м,}$$

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

Параметры выбранной ошиновки сечением трубы 80×4мм:

$D = 42 \text{ мм.}$

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:

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

Напряжение в материале шины, возникающее при воздействии изгибающего момента:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W} = \frac{389,84}{7,27} = 53,62 \text{ МПа.}$$

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

$$\sigma_{доп} = 247 \text{ МПа.}$$

$247 \text{ МПа} \geq 53,62 \text{ МПа}$ – условие выполняется.

2. Проверка по нагреву (допустимому току).

Условие проверки:

$$I_{доп} \geq I_{max},$$

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

$$I_{max} = \frac{\sqrt{P_{сн}^2 + Q_{сн}^2}}{\sqrt{3} \cdot U_{сн}} = \frac{\sqrt{9^2 + 2,7^2 \cdot 10^3}}{\sqrt{3} \cdot 10} = 542,5 \text{ А}$$

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

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

По табл. 1.3.30 ПУЭ (для алюминиевых труб) для выбранной ошиновки сечением трубы $80 \times 4 \text{ мм}$: $I_{доп.ном} = 1700 \text{ А}$.

Для неизолированных проводов и окрашенных шин принято:

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

Допустимый ток:

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

$1388,9 \text{ А} \geq 542,5 \text{ А}$ – 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).

$$q_{\min} = \frac{\sqrt{B_K}}{C_T} = \frac{\sqrt{103,8 \cdot 10^6}}{51} = 199,77 \text{ мм}^2,$$

$$q_{\min} = 199,77 \text{ мм}^2 \leq q = 1384,74 \text{ мм}^2 \text{ – условие выполняется.}$$

4. Проверка на электродинамическую стойкость с учетом механических колебаний.

Условие проверки:

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

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

Частота собственных колебаний алюминиевых шин:

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

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

$6,06 < 30 \text{ Гц}$ – 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:

$$U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ} \geq U_{\text{сет.ном}} = 10 \text{ кВ}$$

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:

$$I_{\max} = \frac{Q_{\text{ку}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{нн}}} = \frac{1700}{\sqrt{3} \cdot 10} = 98,15 \text{ А},$$

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

$$q_s = \frac{I_{\max}}{J_s} = \frac{98,15}{1,1} = 89,23 \text{ мм}^2,$$

где εj – экономическая плотность тока, А/мм² (табл. 1.3.36 ПУЭ)

Сечение округляем до ближайшего стандартного – 95 мм². Выбираем по каталогу кабель АПвП 1х95/16

4. По допустимому току:

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\max},$$

где $I_{\text{доп}}$ – 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).

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{доп.ном}} \cdot k_1 \cdot k_2$$

где $I_{\text{доп.ном}}$ – допустимый ток при нормированной температуре жил (табл. 1.3.7 ПУЭ)

По ПУЭ: $I_{\text{доп.ном}} = 253; k_1 = 0,9; k_2 = 0,71$

$$I_{\text{доп}} = 253 \cdot 0,9 \cdot 0,71 = 161,67 \text{ А}$$

161,97А \geq 98,15А – условие выполняется

Проверка выбранного кабеля на термическую стойкость:

Условие проверки: $q \geq q_{\min}$

где $q_{\min} = \sqrt{W_k / C_T}$ – минимальное сечение проводника, которое при заданном токе КЗ обуславливает нагрев проводника до кратковременной допустимой температуры; q – выбранное сечение шины; W_k – интеграл Джоуля по расчету; C_T – функция, значения которой приведены в табл. 1.6 методического пособия.

$$q_{\min} = \frac{\sqrt{9,8 \cdot 10^6}}{90} = 34,78 \text{ мм}^2,$$

$q_{\min} = 34,78 \text{ мм} \leq q = 95 \text{ мм}$ – условие выполняется.

Все условия выполняются. Окончательно выбираем кабель с одной алюминиевой жилой, с изоляцией из сшитого полиэтилена для прокладки в туннелях АПвП 1х95/25.

Выбор ОПН:

- ограничитель ОПНп-10 УХЛЗ, ОПН-10 УХЛ1

Выбор изоляторов и предохранителей:

- проходные изоляторы ИП-10/1000-7,5 УЗ;

- предохранитель ПКН 001-10 УЗ;

6. Выбор оборудования на стороне СН

На стороне 35 кВ подстанции принимаем к установке комплектное распределительное устройство КРУ «Элтима+» 35кВ.

Выбор выключателя на стороне СН.

Для выбора выключателя на стороне СН расчетной точкой является точка К2 и ток $I_{\text{П0}} = 4016,32 \text{ А}$.

Выбор выключателя производится по следующим параметрам:

1. По напряжению установки: $U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}}$.
2. По длительному току: $I_{\text{max}} \leq I_{\text{ном}}$.

Выключатель ячейки ввода.

Максимальный ток в цепи выключателя:

$$I_{\text{max}} = \frac{S_{\text{max}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{СН}}} = \frac{40 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 35} = 659,83 \text{ А},$$

где S_{max} - мощность трансформатора.

По каталогу выбираем ВР35 на номинальный ток 800А.

Напряжение в цепи выключателя:

$$U_{\text{уст}} = 40,5 \text{ кВ}; U_{\text{ном}} = 35 \text{ кВ}.$$

$$I_{\text{max}} = 659,83 \text{ А} \leq I_{\text{ном}} = 800 \text{ А}.$$

Проверим выбранный выключатель по следующим условиям:

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

$$i_{a,\tau} \leq i_{a,\text{ном}},$$

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

Апериодическая составляющая тока КЗ:

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{П0}} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 4016,32 \cdot e^{\frac{-0,07}{0,0316}} = 345,4 \text{ А},$$

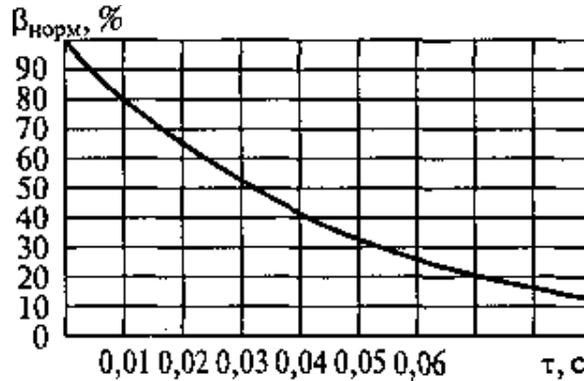
$$\tau = t_{\text{з,мин}} + t_{\text{с.в}} = 0,01 + 0,06 = 0,07 \text{ с},$$

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

Номинальное допустимое значение апериодической составляющей выключаемого тока:

$$i_{a.ном} = (\sqrt{2} \cdot \beta_{ном} \cdot I_{откл.ном}) / 100 = (\sqrt{2} \cdot 20 \cdot 25) / 100 = 7,07 \text{ кА},$$

где $\beta_{ном}$ – нормированное процентное содержание аperiodической составляющей в отключающем токе (по каталогу или на рисунке ниже); $I_{откл.ном}$ – номинальный ток отключения (по каталогу).



Нормированное содержание аperiodической составляющей.

$I_{откл.ном}$ – номинальный ток отключения (по каталогу).

$$i_{a.т} = 345,4 \text{ А} \leq i_{a.ном} = 7,07 \text{ кА} \text{ – условие выполняется.}$$

2. На электродинамическую стойкость:

$$i_{уд} \leq i_{дин},$$

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

Ударный ток КЗ:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot I_{по} \cdot (1 + e^{-0,01/T_a}) = \sqrt{2} \cdot 4016,32 \cdot (1 + e^{-0,01/0,0316}) = 9,487 \text{ кА},$$

$$i_{уд} = 9,487 \text{ кА} \leq i_{дин} = 52 \text{ кА} \text{ – условие выполняется.}$$

3. На термическую стойкость:

$$I_T^2 \cdot t_T \geq B_K,$$

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

Тепловой импульс тока КЗ (расчетный):

$$B_K = I_{по}^2 \cdot (t_{рзА} + t_{выкл} + T_a + 2 \cdot \Delta t) = 4016,32^2 \cdot (0,01 + 0,08 + 0,0316 + 2 \cdot 0,5) = 17,986 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с},$$

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

$$I_i^2 \cdot t_i = 20^2 \cdot 3 = 1200 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с},$$

$$I_T^2 \cdot t_T = 1200 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с} \geq B_K = 17,986 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с} \text{ – условие выполняется.}$$

Секционный выключатель.

Максимальный ток в цепи выключателя:

$$I_{MAX, \text{раб}} = \frac{S_{\text{max, раб}}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{CH}}} = \frac{40 \cdot 10^3}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 35} = 329,91 \text{ A},$$

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

По каталогу выбираем ВР35 на номинальный ток 630А.

Напряжение в цепи выключателя:

$$U_{\text{уст}} = 40,5 \text{ кВ}; U_{\text{ном}} = 35 \text{ кВ}.$$

$$I_{\text{max}} = 329,91 \leq I_{\text{ном}} = 630 \text{ А}.$$

Проверим выбранный выключатель по следующим условиям:

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

$$i_{a, \tau} \leq i_{a, \text{ном}},$$

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

Апериодическая составляющая тока КЗ:

$$i_{a, \tau} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{П0}} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 4016,32 \cdot e^{\frac{-0,07}{0,0316}} = 345,4 \text{ А},$$

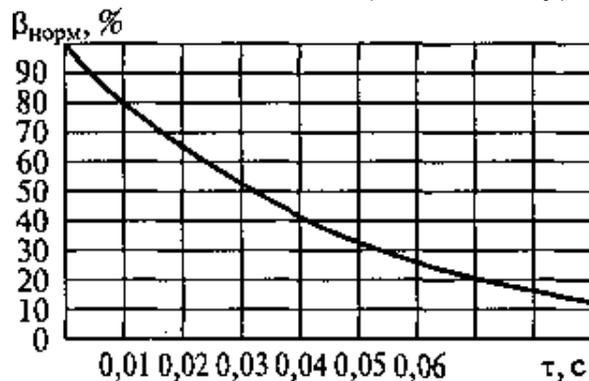
$$\tau = t_{\text{з, мин}} + t_{\text{с.в}} = 0,01 + 0,06 = 0,07 \text{ с},$$

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

Номинальное допустимое значение апериодической составляющей выключаемого тока:

$$i_{a, \text{ном}} = (\sqrt{2} \cdot \beta_{\text{ном}} \cdot I_{\text{откл. ном}}) / 100 = (\sqrt{2} \cdot 20 \cdot 20) / 100 = 5,66 \text{ кА},$$

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



Нормированное содержание апериодической составляющей.

$$i_{a.t} = 345,4 \text{ А} \leq i_{a.ном} = 5,66 \text{ кА} - \text{условие выполняется.}$$

2. На электродинамическую стойкость:

$$i_{уд} \leq i_{дин},$$

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

Ударный ток КЗ:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot I_{по} \cdot (1 + e^{-0,01/T_a}) = \sqrt{2} \cdot 4016,32 \cdot (1 + e^{-0,01/0,0316}) = 9,487 \text{ кА},$$

$$i_{уд} = 9,487 \text{ кА} \leq i_{дин} = 52 \text{ кА} - \text{условие выполняется.}$$

3. На термическую стойкость:

$$I_T^2 \cdot t_T \geq B_K,$$

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

Тепловой импульс тока КЗ (расчетный):

$$B_K = I_{по}^2 \cdot (t_{рза} + t_{выкл} + T_a + \Delta t) = 4016,32^2 \cdot (0,01 + 0,065 + 0,0316 + 0,5) = 9,678 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с},$$

где $t_{выкл}$ – полное время отключения выключателя (по каталогу $t_{выкл} = 0,065$ с); Δt – время ступени селективности (избирательности), $\Delta t = 0,5$ с, (для секционного выключателя принимают Δt).

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

$$I_T^2 \cdot t_T = 1200 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с} \geq B_K = 9,678 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с} - \text{условие выполняется.}$$

Выключатель отходящих линий.

Максимальный ток в цепи выключателя:

$$I_{MAX, раб} = \frac{\sqrt{P_{СН}^2 + Q_{СН}^2}}{N_{отх} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{СН}} = \frac{\sqrt{21^2 + (21 \cdot 0,36)^2} \cdot 10^3}{10 \cdot \sqrt{3} \cdot 35} = 36,81 \text{ А}$$

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

По каталогу выбираем ВР35 на номинальный ток 630 А.

Напряжение в цепи выключателя:

$$U_{уст} = 40,5 \text{ кВ} = U_{ном} = 35 \text{ кВ}.$$

$$I_{max} = 36,81 \text{ А} \leq I_{ном} = 630 \text{ А}.$$

Проверим выбранный выключатель по следующим условиям:

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

$$i_{a.t} \leq i_{a.ном},$$

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

Аperiodическая составляющая тока КЗ:

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{П0} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 4016,32 \cdot e^{\frac{-0,07}{0,0316}} = 345,4 \text{ А,}$$

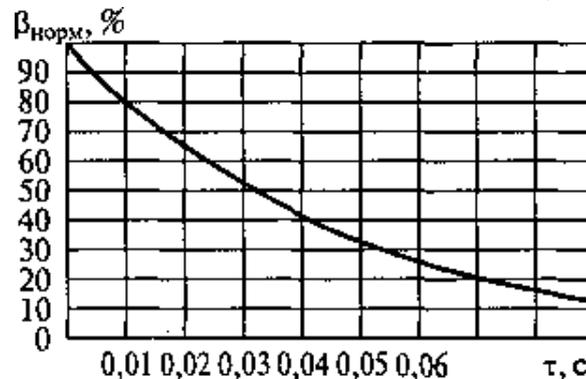
$$\tau = t_{з,мин} + t_{с.в} = 0,01 + 0,06 = 0,07 \text{ с,}$$

где T_a – постоянная времени цепи КЗ, учитывает влияние аperiodической 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, $t_{з,мин} = 0,01 \text{ с}$ – минимальное время действия релейной защиты; $t_{с.в}$ – собственное время отключения выключателя.

Номинальное допустимое значение аperiodической составляющей выключаемого тока:

$$i_{a,ном} = (\sqrt{2} \cdot \beta_{ном} \cdot I_{откл.ном}) / 100 = (\sqrt{2} \cdot 20 \cdot 20) / 100 = 5,66 \text{ кА,}$$

где $\beta_{ном}$ – нормированное процентное содержание аperiodической составляющей в отключающем токе (по каталогу или на рисунке ниже); $I_{откл.ном}$ – номинальный ток отключения (по каталогу).



Нормированное содержание аperiodической составляющей.

$$i_{a,\tau} = 345,4 \text{ А} \leq i_{a,ном} = 5,66 \text{ кА} \text{ – условие выполняется.}$$

2. На электродинамическую стойкость:

$$i_{уд} \leq i_{дин},$$

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

Ударный ток КЗ:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot I_{П0} \cdot (1 + e^{-0,01/T_a}) = \sqrt{2} \cdot 4016,32 \cdot (1 + e^{-0,01/0,0316}) = 9,487 \text{ кА,}$$

$$i_{уд} = 9,487 \text{ кА} \leq i_{дин} = 52 \text{ кА} \text{ – условие выполняется.}$$

3. На термическую стойкость:

$$I_T^2 \cdot t_T \geq B_K,$$

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

Тепловой импульс тока КЗ (расчетный):

$$B_K = I_{\text{П0}}^2 \cdot (t_{\text{РЗА}} + t_{\text{ВЫКЛ}} + T_a) = 4016,32^2 \cdot (0,01 + 0,065 + 0,0316) = 1,855 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{c},$$

где $t_{\text{ВЫКЛ}}$ – полное время отключения выключателя (по каталогу $t_{\text{ВЫКЛ}} = 0,065$ с).

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

$$I_T^2 \cdot t_T = 1200 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{c} \geq B_K = 1,855 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{c} \text{ – условие выполняется.}$$

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

Трансформаторы тока выбираются:

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

2. По длительному току: $I_{\text{МАХ,ТТ}} \leq I_{\text{НОМ}}$.

Выбранные трансформаторы проверяются по следующим условиям:

1. На электродинамическую стойкость: $i_y \leq i_{\text{пр.с}}$;

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

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

В качестве трансформаторов тока для ячейки ввода, секционной ячейки и отходящей линии выбран ТОЛ35 с различным номинальным током.

Ячейка ввода.

Максимальный ток:

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

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

Таблица 6

Расчетные данные	Каталожные данные
$U_{\text{уст}} = 35 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 35 \text{ кВ}$

$I_{max,TT} = \frac{\sqrt{P_{CH}^2 + Q_{CH}^2}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} =$ $= \frac{\sqrt{21^2 + 7,56^2 \cdot 10^3}}{\sqrt{3} \cdot 35} = 368,17 \text{ А}$	$I_{ном} = 400 \text{ А}$
$i_{уд} = 9,787 \text{ кА}$	$i_{дин} = 80 \text{ кА}$
$B_k = 17,986 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$	$I_t^2 \cdot t_t = 13^2 \cdot 1 = 169 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$

Ячейка секционного выключателя.

Максимальный ток:

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

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

Таблица 7

Расчетные данные	Каталожные данные
$U_{уст} = 35 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 35 \text{ кВ}$
$I_{max,TT} = \frac{\sqrt{P_{CH}^2 + Q_{CH}^2}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{ном}} =$ $= \frac{\sqrt{21^2 + 7,56^2 \cdot 10^3}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 35} = 184,09 \text{ А}$	$I_{ном} = 300 \text{ А}$
$i_{уд} = 9,487 \text{ кА}$	$i_{дин} = 80 \text{ кА}$
$B_k = 9,678 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$	$I_t^2 \cdot t_t = 10^2 \cdot 1 = 100 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$

Ячейка отходящих линий.

Максимальный ток:

$$I_{max,TT} = \frac{\sqrt{P_{CH}^2 + Q_{CH}^2}}{N_{отх} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{ном}},$$

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

Таблица 8

Расчетные данные	Каталожные данные
$U_{уст} = 35 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 35 \text{ кВ}$

$I_{max, TT} = \frac{\sqrt{P_{CH}^2 + Q_{CH}^2}}{N_{отх} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{ном}} =$ $= \frac{\sqrt{21^2 + 7,56^2 \cdot 10^3}}{10 \cdot \sqrt{3} \cdot 35} = 36,82 \text{ A}$	$I_{ном} = 300 \text{ A}$
$i_{уд} = 9,487 \text{ кА}$	$i_{дин} = 80 \text{ кА}$
$B_{к} = 1,855 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$	$I_t^2 \cdot t_t = 10^2 \cdot 1 = 100 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$

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

Таблица 9

Прибор	Тип	Нагрузка фаз, ВА		
		А	В	С
Амперметр	Э-335	0,5	0,5	0,5
Ваттметр	Д-365	0,5	-	0,5
Варметр	Д-365	0,5	-	0,5
Счетчик активной и реактивной энергии	Меркурий230ART-00 P(Q)R(C)SIDN	0,1	-	0,1
Итого		1,6	0,5	1,6

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 $r_{к} = 0,1 \text{ Ом}$.

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

$$r_{приб} + r_{пр} + r_{к} \leq z_{2 ном}.$$

Откуда,

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

Найдем $z_{2\text{ном}}$:

$$z_{2\text{ном}} = \frac{S_{\text{вт}}}{I_2^2} = \frac{30}{5^2} = 1,2 \text{ Ом},$$

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

Сопротивление соединительных проводов:

$$r_{\text{пр}} = z_{2\text{ном}} - r_{\text{пр}} - r_{\text{к}} = 1,2 - 0,064 - 0,1 = 1,036 \text{ Ом};$$

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

$$q = \frac{\rho l_{\text{расч}}}{r_{\text{пр}}} = \frac{0,0283 \cdot 80}{1,036} = 2,185 \text{ мм}^2.$$

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 мм² для алюминиевых жил и 1,5 мм² для медных жил (ПУЭ, п. 3.4.4). Сечение больше 6 мм² обычно не применяется. Предварительно принимаем кабель КВВГ с алюминиевыми жилами сечением 4 мм² со следующими параметрами:

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

Определим сопротивление приборов:

$$r_{\text{приб}} = r_0 \cdot l_{\text{расч}} = 0,0079 \cdot 80 = 0,632 \text{ Ом/мм};$$

Найдем z_2 :

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

$$z_2 = 0,796 \text{ Ом} \leq z_{2\text{ном}} = 1,2 \text{ Ом} \text{ – условие выполняется.}$$

Принимаем к установке контрольный кабель КВВГ с алюминиевыми жилами сечением жил 4 мм².

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

Трансформаторы напряжения выбираются:

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

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

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 регистр.	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	Меркурий-230ART-00 P(Q)R(C)SID N	-	-	-	7,5
Фиксатор импульсног о действия	ФИП	3	1	3	9
Итого					54,5

В качестве трансформатора напряжения для ячейки КРУ был выбран НАЛИ-СЭЩ-35-1-75 У2.

Мощность нагрузки на вторичной обмотке трансформатора напряжения:
 $S_{2\Sigma} = 54,5 \text{ ВА} < 75 \text{ ВА}$ - условие выполняется.

Выбор жестких шин на СН.

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

5. Механический расчет однополосных шин.

Наибольшее удельное усилие при трехфазном КЗ:

$$f = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i_{уд}^2}{a} = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot \frac{9763,125^2}{1} = 16,51 \text{ Н/м},$$

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

Изгибающий момент:

$$M_{max} = \frac{f \cdot l^2}{10} = \frac{16,51 \cdot 6^2}{10} = 67,536 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

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

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

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

Найдем сечение q выбранной шины:

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

Момент сопротивления шины относительно оси, перпендикулярной действию усилия:

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

Напряжение в материале шины, возникающее при воздействии изгибающего момента:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W} = \frac{67,536}{16,51} = 3,9 \text{ МПа}.$$

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

$$\sigma_{доп} = 247 \text{ МПа}.$$

$247 \text{ МПа} \geq 3,9 \text{ МПа}$ – условие выполняется.

6. Проверка по нагреву (допустимому току).

Условие проверки:

$$I_{доп} \geq I_{max},$$

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

$$I_{max} = \frac{\sqrt{P_{сн}^2 + Q_{сн}^2}}{\sqrt{3} \cdot U_{сн}} = \frac{\sqrt{21^2 + (21 \cdot 0,36)^2} \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 35} = 368,17 \text{ А}$$

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

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

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

Для неизолированных проводов и окрашенных шин принято:

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

Допустимый ток:

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

$1662,6 \text{ А} \geq 368,17 \text{ А}$ – условие выполняется.

7. Проверка шин на термическую стойкость.

Условие проверки:

$$q \geq q_{\text{min}},$$

где $q_{\text{min}} = \sqrt{B_K} / C_T$ – 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).

$$q_{\text{min}} = \frac{\sqrt{B_K}}{C_T} = \frac{\sqrt{21,653 \cdot 10^6}}{51} = 91,24 \text{ мм}^2,$$

$q_{\text{min}} = 91,24 \text{ мм}^2 \leq q = 954,56 \text{ мм}^2$ – условие выполняется.

8. Проверка на электродинамическую стойкость с учетом механических колебаний.

Условие проверки:

$$J = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64} = \frac{3,14 \cdot (8^4 - 7,2^4)}{64} = 69,11 \text{ см}^4,$$

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

Частота собственных колебаний алюминиевых шин:

$$f_0 = \frac{173,2}{l^2} \sqrt{\frac{J}{q}} = \frac{173,2}{6^2} \sqrt{\frac{69,11}{9,5456}} = 12,94 \text{ Гц},$$

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

$12,94 < 30 \text{ Гц}$ – 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 ОПН:

- ограничитель перенапряжения на стороне ОПН-35 УХЛ1.

Выбор изоляторов и предохранителей:

- опорные изоляторы ОСК5–35–А–4УХЛ1;
- проходные изоляторы ИП-35/400-7,5 УХЛ2;
- предохранитель ПКН 001-35 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 K_c 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 $\cos \varphi = 0,85$, а для остальных потребителей $\cos \varphi = 1$.

Таблица 16

Наименование потребителя	Установленная мощность		$\cos \varphi$	K_c	Расчетная нагрузка S , кВА
	Единицы, кол-во·кВт	Всего кВт			
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:

$$S_{\text{расч}} = K_c \cdot \sqrt{(\sum P_{\text{уст}})^2 + (\sum Q_{\text{уст}})^2} \text{ кВА};$$

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

Число трансформаторов собственных нужд принимаем два.

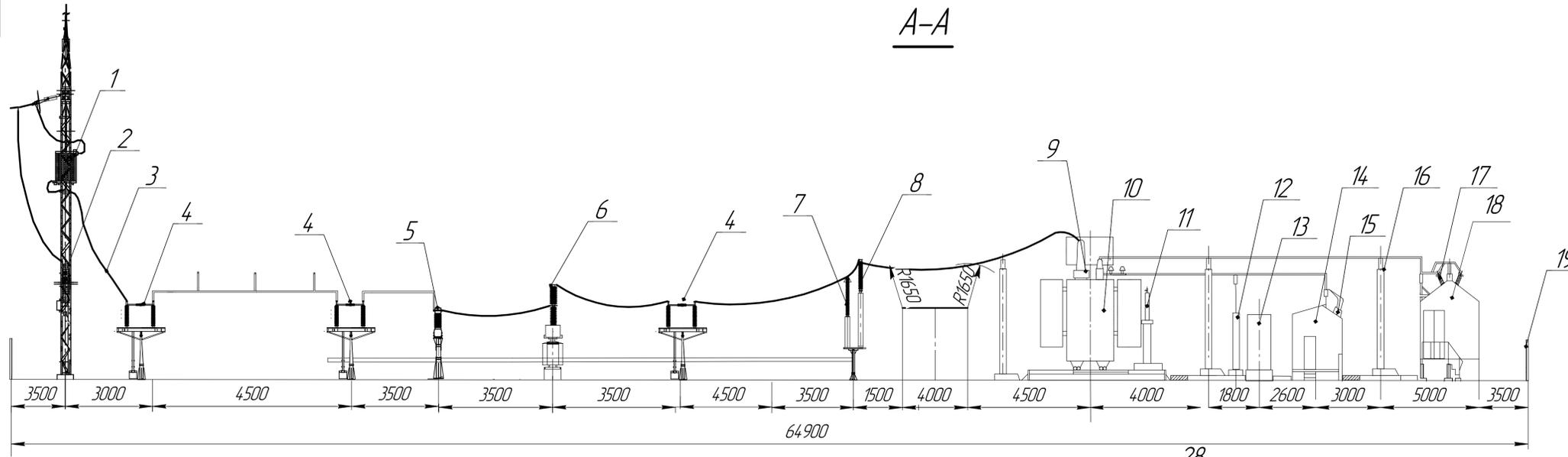
Выбираем трансформатор собственных нужд мощностью 250 кВ·А марки ТМ-250/10.

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.

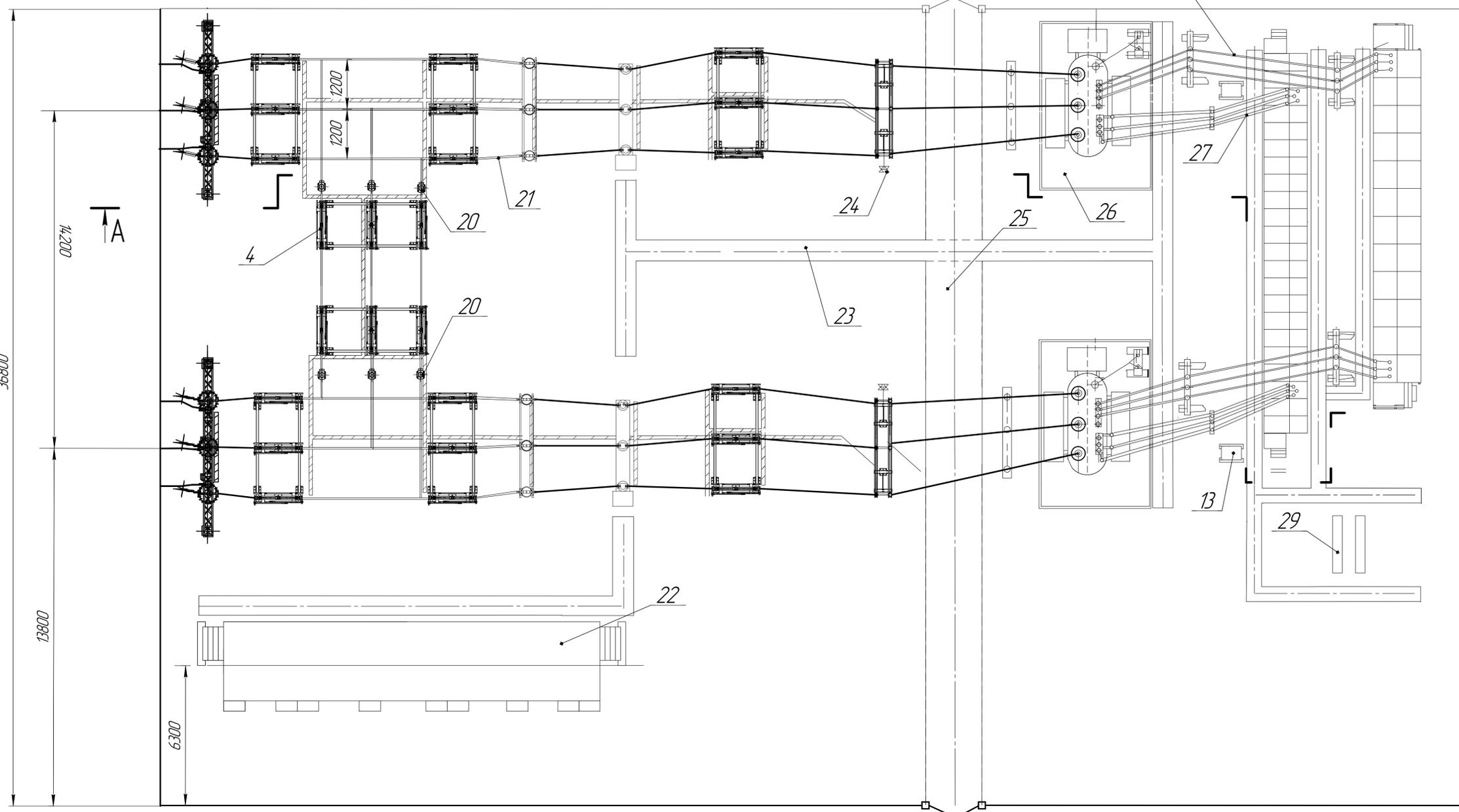
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Кулеева Л.И. Проектирование подстанции: учебное пособие / Л.И. Кулеева, С.В. Митрофанов, Л.А. Семенова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2016.
5. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. РД 153-34.0-20.527–98. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002.
6. Электрические сети, оборудование электроустановок. URL: <http://forca.ru/> (дата обращения: 15.05.2019).

A-A



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-20 трансф.
27	Жесткая ошиновка 10 кВ
28	Жесткая ошиновка 35 кВ
29	Компенсирющие устройства



КР-13.03.02 ЭС-3-16.2020

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Основа проектирования подстанции, линии электропередачи с учетом нормативных требований	Лист	Масштаб	Масштаб
Разраб.	Проект	Гарифуллин МШ		03.05.20		Лист	Листов	1
Исполн.	Утв.	Гарифуллин МШ	Максимов ВВ	03.05.20	План и разрез подстанции №1	КГЗУ Каф. ЭСиС		

Копирабол

Формат А1

Лист № 1
Лист № 2
Лист № 3
Лист № 4
Лист № 5
Лист № 6
Лист № 7
Лист № 8
Лист № 9
Лист № 10
Лист № 11
Лист № 12
Лист № 13
Лист № 14
Лист № 15
Лист № 16
Лист № 17
Лист № 18
Лист № 19
Лист № 20
Лист № 21
Лист № 22
Лист № 23
Лист № 24
Лист № 25
Лист № 26
Лист № 27
Лист № 28
Лист № 29