

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

Институт энергетики и электротехники
(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»
(наименование кафедры)

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
(код и наименование направления подготовки)
Электроснабжение
(направленность (профиль))

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему «Реконструкция системы электроснабжения группы корпусов
химического предприятия»

Студент

А.В. Федоренко

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Ю.В. Черненко

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« » 2019 г.

Тольятти 2019

АННОТАЦИЯ

В данной выпускной квалификационной работе была рассмотрена тема «Реконструкции системы электроснабжения группы корпусов химического предприятия», в качестве исходных, были взяты данные полученные в ходе прохождения преддипломной практики на предприятии ПАО «КуйбышевАзот». За основу взята система электроснабжения отделения сжигания производства гидроксиламинсульфата и кальцинированной соды. На основе данных о потребителях был произведен расчет ожидаемых нагрузок, выбор числа и мощности силовых трансформаторов, выбор электрооборудования и проводников, расчет токов короткого замыкания и расчет заземления.

Выпускная квалификационная работа выполнена в объеме 48 страниц, 4 таблицы, один рисунок и графическая часть выполненная на 6 чертежах формата А1.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Технология получения соды из щелочных отходов производства капролактама.....	5
2 Расчет ожидаемых электрических нагрузок	6
3 Выбор числа и мощности трансформаторов цеховой КТП.....	12
4 Предварительный выбор оборудования и проводников.....	24
5 Расчет токов короткого замыкания.....	33
6 Выбор оборудования для КТП на стороне 0,4 кВ.....	42
7 Расчет заземления подстанции.....	44
Заключение.....	46
Список используемых источников.....	47

ВВЕДЕНИЕ

Система электроснабжения является одним из основных столпов, на котором держится успешное предприятие. Ни для кого не секрет что для нормального функционирования любого производства или отдельно взятого цеха необходимо обеспечить его бесперебойным обеспечением электроэнергией, особенно это касается химических предприятий, так как нарушение технологического процесса может повлечь не только появление брака в готовой продукции, но и создание аварийных ситуаций. На этапе планирования системы электроснабжения цеха так же можно заложить мощности на перспективу развития цеха, согласно с общим планом развития предприятия. Ведь успешное предприятие – это стремление к развитию и совершенствованию, инновациям и экономии, экологическая безопасность и труда. Во всех этих аспектах задействована и электроэнергетическая отрасль.

Целью данной работы является проектирование системы электроснабжения группы корпусов химического предприятия. В ходе расчетов предстоит найти ожидаемые электрические нагрузки, выбрать количество и мощность трансформаторов КТП, определить целесообразность применения компенсирующих устройств, а также выбрать схему электроснабжения корпусов и произвести предварительный выбор проводников и электрооборудования.

1 Технология получения соды из щелочных отходов производства капролактама

Одной из технологий получения кальцинированной соды является огневая переработка отходов, предназначена в первую очередь для обезвреживания жидких отходов, шламов и некоторых твердых отходов с целью их ликвидации и получения одного или нескольких побочных продуктов. Примерами огневой переработки отходов являются обезвреживание щелочного отхода производства капролактама в циклонных реакторах с получением товарной кальцинированной соды. Щелочные отходы содержат в своём составе 16-47% натриевых солей низших дикарбоновых кислот, в основном адипината натрия $(\text{CH}_2)_4(\text{COONa})_2$ и 0,5-2% NaOH. При огневой переработке этих отходов в циклонных реакторах на предприятиях получают побочный продукт с высоким содержанием Na_2CO_3 .

ПАО «КуйбышевАзот» производит соду в результате термической переработки щелочного стока производства капролактама. Получаемая сода может использоваться в чёрной металлургии, в качестве щёлочесодержащего сырья для производства стеклоизделий, в химической промышленности как нейтрализующий агент кислых стоков и для каустификации (метод получения гидроксида натрия), в стройиндустрии для изготовления шлакощелочных вяжущих и бетонов, в нефтедобывающей промышленности как многофункциональный реагент, в целлюлозно-бумажной промышленности в производстве целлюлозы.

2 Расчет ожидаемых электрических нагрузок

Пользуясь методом упорядоченных диаграмм, определим нагрузку. Для того чтобы систематизировать исходные данные по нагрузке в таблицу 1 занесем информацию об электроприемниках питающихся с данной подстанции.

Таблица 1 – Количество и характеристики электроприемников

Наименование потребителя	Количество	P_n , кВт	K_n	$\cos \varphi$	$P_n \Sigma$
Дымосос	4	250	0,75	0,87	1000
Воздуходувка	4	132	0,75	0,87	528
Насос Н17	2	11	0,15	0,8	22
Насос Н21	2	15	0,17	0,8	30
Насос содового раствора	3	55	0,75	0,85	165
Насос спутниковой воды	1	13	0,8	0,8	13
Насос Н23	2	15	0,75	0,8	30
Насос Н24	2	11	0,75	0,8	22
Насос Н28	3	37	0,8	0,85	111
Насос Н30	3	125	0,75	0,85	375
Насос Н33	2	15	0,75	0,8	30
Насос Н34	2	5	0,75	0,8	10
Насос Н40	3	18,5	0,8	0,8	55,5
Насос Н42	2	15	0,75	0,8	30
Насос Н45	2	7,5	0,75	0,8	15
Насос Н47	3	18,5	0,75	0,8	55,5
Насос Н49	2	4	0,75	0,8	8
Насос Н53	2	40	0,75	0,85	80
Насос Н54	2	15	0,75	0,8	30
Приточная вентиляция	6	2,2	0,8	0,8	13,2
Вытяжная вентиляция	8	0,75	0,8	0,8	6
Аварийная вентиляция	2	132	0,7	0,87	22
АТПОМ	8	18	0,8	0,9	35
Станок токарный	1	22	0,55	0,8	22
ВДУ 505	1	40	0,6	0,67	40

На основании исходных данных разделим электроприемники на группы и произведем расчет средней активной и реактивной мощности, для каждой подгруппы электроприемников используя формулы:

$$P_{cp} = P_n \cdot K_n \quad (1)$$

где: P_n – номинальная мощность электроприемника, $K_{и}$ – коэффициент использования

$$Q_{cp} = P_{cp} \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (2)$$

где: P_{cp} – средняя номинальная мощность электроприемника, $\operatorname{tg} \varphi$ – тангенс φ показывающий отношение активной мощности к реактивной для электроприемника.

Определим эффективное число электроприемников по формуле:

$$n_э = \frac{2 \cdot P_{н\Sigma}}{P_{н\max}} = (2 \cdot 1017,45) / 250 = 8 \text{ шт} \quad (3)$$

Найдем средний коэффициент использования, при помощи следующей формулы:

$$K_{и\text{cp}} = \frac{\sum P_{cp}}{\sum P_n} = 1794,98 / 1017,45 = 1,76 \quad (4)$$

Используя справочные данные принимаем коэффициент максимума равным $K_m = 1,04$.

Определим расчетные активные и реактивные нагрузки трехфазных электроприемников:

$$P_p = P_{cp} \cdot K_m = 1794,98 \cdot 1,04 = 1866,78 \text{ кВт} \quad (5)$$

так как $n_э \leq 10$ то формула расчетной реактивной нагрузки будет иметь следующий вид:

$$Q_p = 1,1 \cdot Q_{cp} = 1,1 \cdot 1077,56 = 1185,316 \text{ квар} \quad (6)$$

Определим расчетную нагрузку:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \sqrt{1866,78^2 + 1185,316^2} = 2211,3 \text{ кВА} \quad (7)$$

Определим расчетный ток для электроприемников по формуле:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_n} = 2211,3 / (\sqrt{3} \cdot 0,38) = 3359,72 \text{ А} \quad (8)$$

Все полученные результаты сведем в таблицу 2.

Таблица 2 - Расчет электрических нагрузок

№ п/п	Наименование потребителя	Количество, n	Установленная мощность		m	Ки	cosφ / tgφ	Средняя нагрузка		п _з	Км	Расчетная нагрузка			I _p А
			Одного ЭП, кВт	Общая, кВт				P _{ср} кВт	Q _{ср} квар			P _p кВт	Q _p кВАР	S _p кВА	
1	Дымосос	4	250	1000	-	0,55	0,87/ 0,56	550	308	-	1,04	-	-	-	-
2	Воздуходувка	4	132	528	-	0,55	0,87/ 0,56	290,4	162,6	-	1,04	-	-	-	-
3	РП 1														
4	Насос Н17	2	11	22	-	0,7	0,8/ 0,75	15,4	11,55	-	1,04	-	-	-	-
5	Насос Н21	2	15	30	-	0,7	0,8/ 0,75	21	15,75	-	1,04	-	-	-	-
6	Насос Н23	2	15	30	-	0,7	0,8/ 0,75	21	15,75	-	1,04	-	-	-	-
7	Насос Н24	2	11	22	-	0,7	0,8/ 0,75	15,4	11,55	-	1,04	-	-	-	-
8	Приточная вентиляция	2	2,2	4,4	-	0,9	0,8/ 0,75	3,96	2,97		1,04				
9	Вытяжная вентиляция	2	0,75	1,5	-	0,9	0,8/ 0,75	1,35	1,01		1,04				
10	Итого по РП 1	12	54,95	109,9	-	1,42	-	78,11	58,58	7	1,04	81,23	64,44	103,63	157,6
11	Насос содового раствора	3	55	165	-	0,6	0,85/ 0,62	99	61,38	-	-	-	-	-	-

Продолжение таблицы 2

12	Насос спутниковой воды	1	13	13	-	0,8	0,8/ 0,75	10,4	7,8	-	1,04	-	-	-	-
13	Насос Н28	3	37	111	-	0,65	0,85/ 0,62	72,15	44,73	-	1,04	-	-	-	-
14	Насос Н30	3	125	375	-	0,6	0,85/ 0,62	225	139,5	-	1,04	-	-	-	-
15	Насос Н33	2	15	30	-	0,6	0,8/ 0,75	18	13,5	-	1,04	-	-	-	-
16	Насос Н34	2	5	10	-	0,6	0,8/ 0,75	6	4,5	-	1,04	-	-	-	-
17	Насос Н40	3	18,5	55,5	-	0,7	0,8/ 0,75	38,85	29,14	-	1,04	-	-	-	-
18	Насос Н42	2	15	30	-	0,6	0,8/ 0,75	18	13,5	-	1,04	-	-	-	-
19	Насос Н45	2	7,5	15	-	0,6	0,8/ 0,75	9	6,75	-	1,04	-	-	-	-
20	Насос Н47	3	18,5	55,5	-	0,6	0,8/ 0,75	33,3	24,98	-	1,04	-	-	-	-
21	Насос Н49	2	4	8	-	0,75	0,8/ 0,75	6	4,5	-	1,04	-	-	-	-
22	Насос Н53	2	40	80	-	0,6	0,85/ 0,62	48	29,76	-	1,04	-	-	-	-
23	Насос Н54	2	15	30	-	0,6	0,8/ 0,75	18	13,5	-	1,04	-	-	-	-
24	Приточная вентиляция	4	2,2	8,8	-	0,9	0,8/ 0,75	7,92	8,91	-	1,04	-	-	-	-
25	Вытяжная вентиляция	6	0,75	4,5	-	0,9	0,8/ 0,75	4,05	4,05	-	1,04	-	-	-	-
26	Аварийная вентиляция	2	132	264	-	0,4	0,87/ 0,56	105,6	59,14	-	1,04	-	-	-	-

Продолжение таблицы 2

27	РП 2														
28	АТПОМ	8	18	144	-	0,95	0,9/ 0,48	136,8	65,66	-	1,04	-	-	-	-
29	ВДУ 505	1	40	40	-	0,4	0,67/ 1,11	16	17,76	-	1,04	-	-	-	-
30	Итого по РП 2	9	58	184				152,8	83,42	3	1,04	158,9	91,76	183,49	278,8
24	Станок токарный	1	22	22	-	0,2	0,8/ 0,75	4,4	3,3	-	1,04	-	-	-	-
	Итого	-	1017,45	3099,2	>3	-	-	1794,98	1077,56	8	1,04	1866,78	1185,32	2211,3	3359,72

3 Выбор числа и мощности трансформаторов цеховой КТП

Предварительный выбор трансформаторов осуществим по суммарной расчетной активной мощности цеха: $P_{\Sigma} = 1866,78$ кВт.

«Потребители относятся к I категории надежности электроснабжения, что подразумевает установку двух трансформаторов запитанных от разных источников питания. При расчетах для потребителей первой категории коэффициент загрузки трансформаторов принимают равным $K_3=0,7$ » [4]. Рассмотрим два варианта выбора трансформатора и КУ.

I Вариант: Пользуясь справочными данными [3., таблица1], выберем два трансформатора ТМЗ-1600/6/0,4.

«Определим минимально возможное количество трансформаторов с номинальной мощностью $S_H=1600$ кВА и коэффициентом загрузки $K_3=0,7$ » [4] по следующей формуле:

$$N_T = \frac{P_{p\Sigma}}{K_3 \cdot S_T} = 1866,7 / (0,7 \cdot 1600) = 1,67; \text{ принимаем } N_T = 2 \quad (9)$$

где S_T – мощность одного трансформатора, K_3 – коэффициент загрузки трансформатора.

II Вариант: Пользуясь справочными данными [3., Таблица1], выберем два трансформатора ТМЗ-1000/6/0,4.

«Определим минимально возможное количество трансформаторов с номинальной мощностью $S_H=1000$ кВА и коэффициентом загрузки $K_3=0,7$ » [4] по следующей формуле:

$$N_T = \frac{P_{p\Sigma}}{K_3 \cdot S_T} = 1866,7 / (0,7 \cdot 1000) = 2,67; \text{ принимаем } N_T = 3$$

где S_T – мощность одного трансформатора, K_3 – коэффициент загрузки трансформатора.

3.1 Расчет для первого варианта с двумя трансформаторами ТМЗ-1600/6/0,4

Паспортные данные трансформатора ТМЗ-1600 занесем в таблицу 3.

Таблица 3 - Паспортные данные трансформатора ТМЗ - 1600

Тип	Номинальная мощность, кВА	Характеристики					
		Номинальное напряжение обмоток		ΔP_{xx} , кВт	ΔP_{k3} , кВт	u_{k3} , %	I_{xx} , %
		ВН	НН				
ТМЗ	1600	6	0,4	2,8	14	6,2	1,3

Вычислим потери в трансформаторе используя формулы:

$$\Delta P_T = N_T \cdot (\Delta P_{xx} + K_3^2 \cdot \Delta P_{k3}) = 2 \cdot (2,8 + 0,7^2 \cdot 14) = 19,32 \text{ кВт} \quad (10)$$

$$\Delta Q_T = N_T \cdot (I_{xx} + K_3^2 \cdot \Delta P_{k3}) \cdot \frac{S_H}{100} = 2 \cdot (1,3 + 0,7^2 \cdot 14) \cdot \frac{1600}{100} = 285,38 \text{ квар} \quad (11)$$

где P_T – потери активной мощности одного трансформатора, Q_T – потери реактивной мощности одного трансформатора, N_T – количество трансформаторов.

Вычислим расчетную нагрузку цеха с учетом потери в трансформаторе [4., с 54]:

$$P_p = P_{p\Sigma} + \Delta P_T = 1866,7 + 19,32 = 1886,02 \text{ кВт} \quad (12)$$

$$Q_p = Q_{p\Sigma} + \Delta Q_T = 1185,32 + 328,32 = 1470,7 \text{ квар} \quad (13)$$

Реактивная мощность в часы минимальной нагрузки для предприятия химической промышленности 85% от расчетного максимума [6]:

$$Q_{\min} = Q_{p\Sigma} \cdot 0,85 = 1185,32 \cdot 0,85 = 1007,52 \text{ квар} \quad (14)$$

Определим значение входных реактивных мощностей в часы максимума:

$$Q'_{\text{эл}} = Q_p - 0,7 \cdot Q_{\text{сд}} = 1470,7 - 0,7 \cdot 0 = 1470,7 \text{ квар} \quad (15)$$

где $Q_{\text{сд}}$ – реактивная мощность синхронных двигателей, так как в нашем цеху синхронные двигатели отсутствуют, принимаем это значение равным нулю.

$$Q'_{\text{эл}} = \alpha \cdot P_p = 0,28 \cdot 1886,02 = 528,09 \text{ квар} \quad (16)$$

где α – расчетный коэффициент, соответствующий установленными предприятию условиями получения от энергосистемы мощностей [4., Таблица 4,1].

Принимаем меньшее из значений, так как в часы максимума напряжение пониженное: $Q_{\text{эл}} = 528,09$ квар

Определим значение входных реактивных мощностей в часы наименьших нагрузок:

$$Q'_{\text{с2}} = Q_{\min} - Q_{\text{кд}} = Q_{\min} - (Q_p - Q_{\text{эл}}) = 1007,52 - (1470,7 - 528,09) = 64,91 \text{ квар} \quad (17)$$

где Q_{\min} – мощность реактивной нагрузки предприятия в часы минимальной нагрузки энергосистемы, $Q_{\text{кд}}$ – мощность компенсирующих устройств устанавливаемых предприятием для снижения потребления Q до величины $Q_{\text{эл}}$ [4., с 47].

$$Q'_{\Sigma 2} = Q_{\min} + Q_K = 1007,52 + 0 = 1007,52 \text{ квар} \quad (18)$$

где Q_K – мощность, генерируемая компенсирующими устройствами предприятия в часы минимальной активной нагрузки энергосистемы.

Из-за того что «в часы минимальных нагрузок напряжение в энергосистеме повышено принимаем большее из значений» [6] $Q_{\Sigma 2} = 1007,52$ квар.

Вычислим суммарную мощность компенсирующих устройств:

$$Q_{\text{ку max}} = 1,1 \cdot Q_P - Q_{\Sigma 1} = 1,1 \cdot 1470,7 - 528,09 = 1089,68 \text{ квар} \quad (19)$$

Вычислим мощность нерегулируемых КУ:

$$Q_{\text{ку min}} = Q_{\min} - Q_{\Sigma 2} = 1007,52 - 1007,52 = 0 \text{ квар} \quad (20)$$

из этого равенства следует, что «все КУ должны быть регулируемыми» [6].

«Определим реактивную мощность, которая должна быть передана из сети 6 кВ в сеть 0,4кВ и не должна компенсироваться» [6], используя формулу:

$$Q_{\text{эн}} = Q_{\Sigma 1} - (Q_P - Q_{P\Sigma}) = 528,09 - (1470,7 - 1185,32) = 242,71 \text{ квар} \quad (21)$$

Определим реактивную мощность, которую целесообразно передать из сети 6 кВ в сеть 0,4кВ по формуле:

$$Q_T = \sqrt{(N_T \cdot K_3 \cdot S_{HT})^2 - P_{P\Sigma}^2} = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 1600)^2 - 1866,7^2} = 1238,15 \text{ квар} \quad (22)$$

где S_{HT} – номинальная мощность трансформатора, N_T – количество трансформаторов, K_3 – коэффициент запаса, $P_{p\Sigma}$ – расчетная активная нагрузка.

Определим реактивную мощность компенсирующих устройств, которые могут быть установлены на стороне до 1000В по формуле:

$$Q_{кун} = Q_{p\Sigma} - Q_T = 1185,32 - 1751,87 = -52,83 \text{ квар} \quad (23)$$

так как $Q_{кун}$ не меньше 100 кВАР, установка компенсирующих устройств на стороне до 1 кВ не целесообразна.

Определим затраты на установку КТП с трансформатором ТМЗ-1600/6/0,4:

$$Z_{кТП} = (E \cdot K_{ТП} + C \cdot \Delta P_T) \cdot N \quad (24)$$

где E – суммарный коэффициент отчисления от капиталовложения в КТП, $K_{ТП}$ – стоимость КТП, C – удельная стоимость максимальный активных нагрузочных потерь, N – количество трансформаторов.

$$K_{ТП} = k_T \cdot N_T = 915 \cdot 2 = 1830 \text{ тыс.ру} \quad (25)$$

где k_T – стоимость одного трансформатора, N_T – количество трансформаторов.

Стоимость потери мощности в трансформаторе определим по формуле:

$$C \cdot \Delta P_T = C_0 \cdot P_{xx} + C \cdot K_3^2 \cdot \Delta P_{кз} \quad (26)$$

где C_0 удельная стоимость потери холостого хода трансформатора.

«Значения параметров C_0 и C определяются на основании действующих тарифов на электроэнергию, по выражениям» [6]:

$$C_0 = \left(\frac{\alpha}{T_M} + \beta \cdot 10^{-2} \right) \cdot T_p; \quad (27)$$

$$C = \left(\frac{\alpha}{T_M} + \beta \cdot 10^{-2} \right) \cdot \tau, \quad (28)$$

где α – основная ставка двухставочного тарифа равная, β - плата за 1 кВт·час потребленной энергии, T_M – время использования максимальной нагрузки предприятия в год 6100ч, T_p – время работы трансформатора в году 8760ч, τ – время максимальных потерь, которое можно вычислить по приближенной формуле:

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_M}{10000} \right)^2 \cdot 8760 = 4719 \text{ ч} \quad (29)$$

$$C = \left(\frac{\alpha}{T_M} + \beta \cdot 10^{-2} \right) \cdot \tau = 5739,8 \text{ руб/кВт} \cdot \text{год} \quad (30)$$

$$C_0 = \left(\frac{\alpha}{T_M} + \beta \cdot 10^{-2} \right) \cdot T_p = 10655 \text{ руб/кВт} \cdot \text{год} \quad (31)$$

Все данные взяты из [4., с 58].

Вычислим стоимость потери мощности в трансформаторе:

$$C \cdot \Delta P_T = C_0 \cdot P_{xx} + C \cdot K^2 z \cdot \Delta P_{кз} = 10655 \cdot 2,8 + 5738,85 \cdot 0,7^2 \cdot 14 = 69200 \text{ руб/год}$$

$$Z_{кпп} = (E \cdot K_{пп} + C \cdot \Delta P_T) \cdot N = (0,223 \cdot 1830 + 69,2) \cdot 2 = 954580 \text{ руб}$$

Затраты на КУ в данном случае не считаем.

3.2 Расчет для второго варианта с тремя трансформаторами ТМЗ-1000/6/0,4

Паспортные данные трансформатора ТМЗ-1000 занесем в таблицу 4.

Таблица 4 - Паспортные данные трансформатора ТМЗ - 1000

Тип	Номинальная мощность, кВА	Характеристики					
		Номинальное напряжение обмоток		ΔP_{xx} , кВт	$\Delta P_{кз}$, кВт	$u_{кз}$, %	I_{xx} , %
		ВН	НН				
ТМЗ	1000	6	0,4	2,1	9,7	6,2	1,4

Вычислим потери в трансформаторе используя формулы:

$$\Delta P_T = N_T \cdot (\Delta P_{xx} + K_3^2 \cdot \Delta P_{кз}) = 3 \cdot (2,1 + 0,7^2 \cdot 9,7) = 20,56 \text{ кВт}$$

$$\Delta Q_T = N_T \cdot (I_{xx} + K_3^2 \cdot \Delta P_{кз}) \cdot \frac{S_H}{100} = 3 \cdot (1,4 + 0,7^2 \cdot 9,7) \cdot \frac{1000}{100} = 184,59 \text{ квар}$$

где P_T – потери активной мощности одного трансформатора, Q_T – потери реактивной мощности одного трансформатора, N_T – количество трансформаторов.

Вычислим расчетную нагрузку цеха с учетом потери в трансформаторе [4., с 54]:

$$P_p = P_{p\Sigma} + \Delta P_T = 1866,7 + 20,56 = 1887,26 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_{p\Sigma} + \Delta Q_T = 1185,32 + 184,59 = 1369,91 \text{ квар}$$

«Реактивная мощность в часы минимальной нагрузки для предприятия химической промышленности 85% от расчетного максимума» [6]:

$$Q_{\min} = Q_{p\Sigma} \cdot 0,85 = 1185,32 \cdot 0,85 = 1007,52 \text{ квар}$$

Определим значение входных реактивных мощностей в часы максимума по выражению:

$$Q'_{\text{э1}} = Q_p - 0,7 \cdot Q_{\text{сд}} = 1470,7 - 0,7 \cdot 0 = 1470,7 \text{ квар}$$

где $Q_{\text{сд}}$ – реактивная мощность синхронных двигателей, так как в нашем цеху синхронные двигатели отсутствуют, принимаем это значение равным нулю.

$$Q'_{\text{э1}} = \alpha \cdot P_p = 0,28 \cdot 1886,02 = 528,09 \text{ квар}$$

где α – расчетный коэффициент, соответствующий установленными предприятию условиями получения от энергосистемы мощностей [4., Таблица 4,1].

Принимаем меньшее из значений, так как в часы максимума напряжение пониженное: $Q_{\text{э1}} = 528,09$ квар

Определим значение входных реактивных мощностей в часы наименьших нагрузок:

$$Q'_{\text{э2}} = Q_{\min} - Q_{\text{КД}} = Q_{\min} - (Q_p - Q_{\text{э1}}) = 1007,52 - (1369,91 - 528,09) = 166,04 \text{ квар}$$

где Q_{\min} – мощность реактивной нагрузки предприятия в часы минимальной нагрузки энергосистемы, $Q_{\text{КД}}$ – мощность компенсирующих устройств устанавливаемых предприятием для снижения потребления Q до величины $Q_{\text{э1}}$ [4., с 47].

$$Q'_{\text{э2}} = Q_{\min} + Q_{\text{К}} = 1007,52 + 0 = 1007,52 \text{ квар}$$

где Q_K – мощность, генерируемая компенсирующими устройствами предприятия в часы минимальной активной нагрузки энергосистемы.

Из-за того что «в часы минимальных нагрузок напряжение в энергосистеме повышено принимаем большее из значений» [6] $Q_{32}=1007,52$ кВАР.

Вычислим суммарную мощность компенсирующих устройств:

$$Q_{\text{куmax}} = 1,1 \cdot Q_p - Q_{31} = 1,1 \cdot 136,91 - 528,09 = 978,47 \text{ квар}$$

Вычислим мощность нерегулируемых компенсирующих устройств:

$$Q_{\text{куmin}} = Q_{\text{min}} - Q_{32} = 1007,52 - 1007,52 = 0 \text{ квар}$$

из этого равенства следует, что «все КУ должны быть регулируемые» [6].

«Определим реактивную мощность, которая должна быть передана из сети 6 кВ в сеть 0,4кВ и не должна компенсироваться» [6], используя формулу:

$$Q_{\text{эн}} = Q_{31} - (Q_p - Q_{p\Sigma}) = 528,09 - (136,91 - 1185,32) = 343,84 \text{ квар}$$

Определим реактивную мощность, которую целесообразно передать из сети 6 кВ в сеть 0,4кВ по формуле:

$$Q_T = \sqrt{(N_T \cdot K_3 \cdot S_{HT})^2 - P_{p\Sigma}^2} = \sqrt{(3 \cdot 0,7 \cdot 1000)^2 - 1866,7^2} = 961,99 \text{квар}$$

где S_{HT} – номинальная мощность трансформатора, N_T – количество трансформаторов, K_3 – коэффициент запаса, $P_{p\Sigma}$ – расчетная активная нагрузка.

Определим реактивную мощность компенсирующих устройств, которые могут быть установлены на стороне до 1000В по формуле:

$$Q_{\text{кун}} = Q_{\text{p}\Sigma} - Q_{\text{T}} = 1185,32 - 961,99 = 223,33 \text{ квар}$$

К установке принимаем две конденсаторных установки КРМ 0,4 по 110 квар с пошаговым (ступенчатым) регулированием реактивной мощности. Рассчитаем затраты на компенсирующее устройство по формуле:

$$Z_{\text{кун}} = K_{\text{p}} \cdot N_{\text{кун}} = 50000 \cdot 2 = 100000 \text{ руб} \quad (32)$$

где $K_{\text{p}}=50000$ руб – стоимость одного компенсирующего устройства, $N_{\text{кун}}=2$ – количество компенсирующих устройств, принятых к установке.

Рассчитаем затраты на установку КТП с трансформатором ТМЗ-1000/6/0,4 используя ранее приведенную формулу:

$$Z_{\text{ктп}} = (E \cdot K_{\text{ктп}} + C \cdot \Delta P_{\text{T}}) \cdot N$$

где E – суммарный коэффициент отчисления от капиталовложения в КТП, $K_{\text{ктп}}$ – стоимость КТП, C – удельная стоимость максимальный активных нагрузочных потерь, N – количество трансформаторов.

Вычислим стоимость КТП по ранее известной формуле:

$$K_{\text{ктп}} = k_{\text{T}} \cdot N_{\text{T}} = 575 \cdot 3 = 1725000 \text{ руб}$$

где k_{T} – стоимость одного трансформатора, N_{T} – количество трансформаторов.

Стоимость потери мощности в трансформаторе определим по формуле:

$$C \cdot \Delta P_T = C_0 \cdot P_{xx} + C \cdot K^2_{\Sigma} \cdot \Delta P_{\Sigma}$$

где C_0 удельная стоимость потери холостого хода трансформатора.

«Значения параметров C_0 и C определяются на основании действующих тарифов на электроэнергию, по выражениям» [6]:

$$C_0 = \left(\frac{\alpha}{T_M} + \beta \cdot 10^{-2} \right) \cdot T_p ;$$

$$C = \left(\frac{\alpha}{T_M} + \beta \cdot 10^{-2} \right) \cdot \tau$$

где α – основная ставка двухставочного тарифа, β – плата за 1 кВт·час потребленной энергии, T_M – время использования максимальной нагрузки предприятия в год 6100ч, T_p – время работы трансформатора в году 8760ч, τ – время максимальных потерь, которое можно вычислить по приближенной формуле:

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_M}{10000} \right)^2 \cdot 8760 = 4719 \text{ ч} ;$$

$$C = \left(\frac{\alpha}{T_M} + \beta \cdot 10^{-2} \right) \cdot \tau = 5739,8 \text{ руб/кВт} \cdot \text{год} ;$$

$$C_0 = \left(\frac{\alpha}{T_M} + \beta \cdot 10^{-2} \right) \cdot T_p = 10655 \text{ руб/кВт} \cdot \text{год} .$$

Все данные взяты из [4., с 58].

Вычислим стоимость потери мощности в трансформаторе:

$$C \cdot \Delta P_T = C_0 \cdot P_{xx} + C \cdot K^2_{\Sigma} \cdot \Delta P_{\Sigma} = 10655 \cdot 2,1 + 5739,8 \cdot 0,7^2 \cdot 9,7 = 49660 \text{ руб/год}$$

Рассчитаем затраты на КТП с трансформатором ТМЗ 1000/6:

$$Z_{\text{кТП}} = (E \cdot K_{\text{ТП}} + C \cdot \Delta P_{\text{Т}}) \cdot N = (0,223 \cdot 172 \cdot 5 + 49,66) \cdot 3 = 1294000 \text{ руб}$$

$$Z_{\text{общее}} = Z_{\text{кУ}} + Z_{\text{кТП}} = 100000 + 1294000 = 1394000 \text{ руб} \quad (33)$$

По результатам расчетов делаем выбор КТП с установкой двух трансформаторов ТМЗ 1600/6/0,4, компенсация мощности в этом случае не требуется.

4 Предварительный выбор оборудования и проводников

Имея в наличии значения номинальных токов оборудования, произведем предварительный подбор шинопроводов, кабельных линий, защитных автоматов и другого оборудования.

4.1 Подбор шинопроводов

Используя расчетные данные из таблицы 3 и данные из [6] подберем подходящие по характеристикам шинопроводы.

Для магистрального шинопровода Ш1 идущего от трансформаторов до ЩСУ 1 и ЩСУ 2: расчетный ток равен 3359,72 А – к установке принимаем магистральный шинопровод фирмы SchneiderElectric тип КТС4000ER41 длиной 20 м.

4.2 Подбор кабельных линий

Для питания удаленных от ТП потребителей РП1 и РП2 от РУ 0,4 кВ выберем кабель марки АВБбШв – это силовой бронированный лентами кабель, с алюминиевой жилой, изоляцией и защитным шлангом из ПВХ. К РП1 и РП2 будут проложены по два параллельных кабеля, так как в них будут установлены по две секции с независимым друг от друга питанием и секционным выключателем. Используя расчетные данные из таблицы 2 и данные из [5., с 55-73], [7] подберем сечение жил кабелей исходя из значений расчетного тока.

Кабель питания РП1: расчетный ток равен 157,6 А, примем сечение жил равное $4 \times 95 \text{ мм}^2$, длина 85 м.

Кабель питания РП2: расчетный ток равен 278,8 А, примем сечение жил равное $4 \times 240 \text{ мм}^2$, длина 40 м.

Далее выберем медные кабели для каждого электроприемника отдельно, так как питание на них идет с ЩСУ расположенных в ТП напрямую. Для наших условий эксплуатации подходит кабель марки «ВБВнг, силовой бронированный лентами кабель с медной жилой, изоляцией из ПВХ, оболочкой из ПВХ пониженной горючести» [7]. Используя

справочную информацию, подберем подходящее сечение кабеля в зависимости от потребляемой мощности электроприемника, а также длину исходя из плана расположения электроприемников.

Для питания дымососов выбираем сечение кабеля исходя из мощности потребителей, в нашем случае это 250 кВт, следовательно выбираем сечение $3 \times 185 + 1 \times 95$ мм². Далее выберем длину питающего кабеля для каждого электроприемника:

- Кабель питания В 6/1: длина 45м;
- Кабель питания В 6/2: длина 57м;
- Кабель питания В 6/3: длина 47м;
- Кабель питания В 6/4: длина 60м.

Питание воздуходувок осуществим кабелем сечение которого равно $3 \times 95 + 1 \times 50$ мм², так как мощность электродвигателей на этой позиции составляет 132 кВт. Подберем длину питающего кабеля для каждого электроприемника:

- Кабель питания В 8/1: длина 39м;
- Кабель питания В 8/2: длина 47м;
- Кабель питания В 8/3: длина 34м;
- Кабель питания В 8/4: длина 42м.

Выберем кабели питания насосов позиции Н28/1, Н28/2, Н28/3. Так как данные позиции находятся рядом друг с другом, установленные мощности их электродвигателей одинаковы и составляют 37 кВт, то длина и марка кабелей будут одинаковы. Питание этих электроприемников выполним тремя кабелями ВВВнг 4×6 мм², длиной 45м каждый.

Выберем кабели питания насосов позиции Н33/1, Н33/2. Позиции находятся рядом друг с другом, установленные мощности их электродвигателей одинаковы и составляют 15 кВт, длина и марка кабелей будут так же одинаковы. Питание этих электроприемников выполним двумя кабелями ВВВнг 4×4 мм², длиной 45м каждый.

Выберем кабели питания насосов позиции Н30/1, Н30/2, Н30/3. Позиции находятся рядом друг с другом, установленные мощности их электродвигателей одинаковы и составляют 125 кВт, длина и марка кабелей будут одинаковы. Питание этих электроприемников выполним тремя кабелями ВБВнг 4х95 мм², длиной 42м каждый.

Далее выбираем кабели питания насосов на позициях Н34/1, Н34/2. Позиции находятся рядом друг с другом, установленные мощности их электродвигателей так же одинаковы и составляют 5 кВт, длина и марка кабелей будут одинаковы. Питание этих электроприемников выполним тремя кабелями ВБВнг 4х1,5 мм², длиной по 50м каждый.

Выбираем кабели питания насосов на позициях Н53/1, Н53/2. Позиции находятся рядом друг с другом, установленные мощности их электродвигателей так же одинаковы и составляют 40 кВт, длина и марка кабелей будут одинаковы. Питание этих электроприемников выполним тремя кабелями ВБВнг 4х16 мм², длиной по 45м каждый.

Выбираем кабели питания насосов на позициях Н49/1и Н49/2. Позиции находятся рядом друг с другом, установленные мощности их электродвигателей так же одинаковы и составляют 4 кВт, длина и марка кабелей будут одинаковы. Питание этих электроприемников выполним тремя кабелями ВБВнг 4х1,5 мм², длиной по 48м каждый.

Выбираем кабели питания насосов на позициях Н54/1, Н54/2. Позиции находятся рядом друг с другом, установленные мощности их электродвигателей так же одинаковы и составляют 15 кВт, длина и марка кабелей будут одинаковы. Питание этих электроприемников выполним тремя кабелями ВБВнг 4х4 мм², длиной по 56м каждый.

Выбираем кабели питания насосов на позициях Н42/1, Н42/2. Позиции находятся рядом друг с другом, установленные мощности их электродвигателей так же одинаковы и составляют 15 кВт, длина и марка кабелей будут одинаковы. Питание этих электроприемников выполним тремя кабелями ВБВнг 4х4мм², длиной по 58м каждый.

Выбираем кабели питания насосов на позициях Н45/1, Н45/2. Позиции находятся рядом друг с другом, установленные мощности их электродвигателей так же одинаковы и составляют 7,5 кВт, длина и марка кабелей будут одинаковы. Питание этих электроприемников выполним тремя кабелями ВВВнг 4x1,5 мм², длиной по 61м каждый.

Выберем кабели питания насосов позиции Н47/1, Н47/2, Н47/3. Позиции находятся рядом друг с другом, установленные мощности их электродвигателей одинаковы и составляют 18,5 кВт, длина и марка кабелей будут одинаковы. Питание этих электроприемников выполним тремя кабелями ВВВнг 4x4 мм², длиной 65м каждый.

Выберем кабели питания насосов позиции Н40/1, Н40/2, Н40/3. Позиции находятся рядом друг с другом, установленные мощности их электродвигателей одинаковы и составляют 18,5 кВт, длина и марка кабелей будут одинаковы. Питание этих электроприемников выполним тремя кабелями ВВВнг 4x4 мм², длиной по 70м каждый.

Выберем кабель для электроприемников питающихся от РП1.

Подбираем подходящие кабели питания насосов на позициях Н24/1, Н24/2. Позиции находятся рядом друг с другом, установленные мощности их электродвигателей так же одинаковы и составляют 11 кВт, длина и марка кабелей будут одинаковы. Питание этих электроприемников выполним тремя кабелями ВВВнг 4x2,5 мм², длиной по 27м каждый.

Выбираем кабели питания насосов на позициях Н17/1, Н17/2. Позиции находятся рядом друг с другом, установленные мощности их электродвигателей так же одинаковы и составляют 11 кВт, длина и марка кабелей будут одинаковы. Питание этих электроприемников выполним тремя кабелями ВВВнг 4x1,5 мм², длиной по 21м каждый.

Выбираем кабели питания насосов на позициях Н23/1, Н23/2. Позиции находятся рядом друг с другом, установленные мощности их электродвигателей так же одинаковы и составляют 15 кВт, длина и марка

кабелей будут одинаковы. Питание этих электроприемников выполним тремя кабелями ВВВнг 4х4 мм², длиной по 20м каждый.

Подберем подходящий кабель для питания насоса Н21/3. Мощность электродвигателя на этой позиции составляет 13 кВт, необходимая длина кабеля составляет 23м. Анализируя исходные данные можно сделать вывод, что по характеристикам подходит кабель ВВВнг 4х2,5 мм².

4.3 Выбор аппаратов защиты

Для защиты электроприемников, пользуясь справочными данными, выберем автоматические выключатели фирмы SchneiderElectric исходя из значений расчетного тока, найти который можно используя формулы 5, 6, 7, 8.

Вводной выключатель для шинопровода ЩСУ1:
расчетный ток на шинопровode равен 1600 А, выберем автоматический выключатель модель: Masterpact NW16 – номинальный ток выключателя 1600 А, ток теплового расцепителя 0,8 от номинала, ток отключения 65 кА.

Вводной выключатель для шинопровода ЩСУ2 ставится аналогичный ЩСУ1.

Выключатели для РП1:
так как потребители питающиеся от РП1 равномерно распределены на две секции, а само РП1 питается с двух разных секций, то выключателей будет тоже два. Расчетный ток для РП1 равен 157А, выберем автоматический выключатель типа EZC250F3100 – номинальный ток выключателя 250 А, ток теплового расцепителя 100 А, ток отключения 9 кА.

Выключатели для РП2:
потребители питающиеся от РП2 равномерно распределены на две секции, а сам РП питается с двух разных секций, устанавливается два аналогичных выключателя. Расчетный ток на каждой секции РП2 равен 140А, выберем автоматический выключатель типа EZC250F3150 – номинальный ток выключателя 250 А, ток теплового расцепителя 150 А, ток отключения 10 кА.

Далее расчет номинального тока электродвигателей будет произведен по формулам:

$$S = P / \cos\varphi \quad (34)$$

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot 0,38} \quad (35)$$

Автоматические выключатели для позиций В6/1, В6/2, В6/3, В6/4:
расчетный ток равен 436 А, выберем четыре автоматических выключателя типа LV432948 – номинальный ток выключателей 500 А, ток теплового расцепителя 500А, уставка тока срабатывания при коротком замыкании 5 кА.

Автоматические выключатели для позиций В8/1, В8/2, В8/3, В8/4:
расчетный ток равен 230 А, выберем четыре автоматических выключателя типа LV431100 – номинальный ток выключателей 250 А, ток теплового расцепителя 250 А, уставка тока срабатывания при КЗ 5-10 I_н.

Автоматические выключатели для позиций Н17/1, Н17/2:
расчетный ток равен 20 А, выберем два автоматических выключателя типа LV426101 – номинальный ток выключателей 25 А, ток теплового расцепителя 25 А, ток отключения 720 А.

Автоматические выключатели для позиций Н21/1, Н21/2:
расчетный ток равен 28 А, выберем два автоматических выключателя типа LV426102 – номинальный ток выключателей 32 А, ток теплового расцепителя 32 А, ток отключения 720А.

Автоматические выключатели для позиций Н47/1, Н47/2, Н47/3:
расчетный ток равен 98А, выберем три автоматических выключателя типа LV426108 – номинальный ток выключателей 125 А, ток теплового расцепителя 125 А с уставкой 0,7-1 номинала, ток отключения 1,5 кА.

Автоматический выключатель для позиций Н21/3:

расчетный ток равен 25А, выберем автоматический выключатель типа LV426101 – номинальный ток выключателей 25 А, ток теплового расцепителя 25 А, ток отключения 720 А.

Автоматические выключатели для позиций Н23/1, Н23/2:

расчетный ток равен 28 А, выберем два автоматических выключателя типа LV426102 – номинальный ток выключателей 32 А, ток теплового расцепителя 32 А, ток отключения 720А.

Автоматические выключатели для позиций Н24/1, Н24/2:

расчетный ток равен 20 А, выберем два автоматических выключателя типа LV426101 – номинальный ток выключателей 25 А, ток теплового расцепителя 25 А, ток отключения 720 А.

Автоматические выключатели для позиций Н28/1, Н28/2, Н28/3:

расчетный ток равен 66А, выберем три автоматических выключателя типа LV426106 – номинальный ток выключателей 80А, ток теплового расцепителя 80 А с уставкой 0,7-1 номинала, ток отключения 1,2 кА.

Автоматические выключатели для позиций Н30/1, Н30/2, Н30/3:

расчетный ток равен 224А, выберем три автоматических выключателя типа LV431100 – номинальный ток выключателей 250 А, ток теплового расцепителя 250 А с уставкой 0,7-1 номинала, ток отключения 2,5 кА.

Автоматические выключатели для позиций Н33/1, Н33/2:

расчетный ток равен 28 А, выберем два автоматических выключателя типа LV426102 – номинальный ток выключателей 32 А, ток теплового расцепителя 32 А, ток отключения 720А.

Автоматические выключатели для позиций Н34/1, Н34/2:

расчетный ток равен 9,5 А, выберем два автоматических выключателя типа LV426100 – номинальный ток выключателей 16 А, ток теплового расцепителя 16 А с уставкой срабатывания 0,7-1 номинала, ток отключения 600 А.

Автоматические выключатели для позиций Н40/1, Н40/2, Н40/3:

расчетный ток равен 35А, выберем три автоматических выключателя типа LV426103 – номинальный ток выключателей 40 А, ток теплового расцепителя 40 А, ток отключения 720 А.

Автоматические выключатели для позиций Н42/1, Н42/2:

расчетный ток равен 28 А, выберем два автоматических выключателя типа LV426102 – номинальный ток выключателей 32 А, ток теплового расцепителя 32 А, ток отключения 720А.

Автоматические выключатели для позиций Н45/1, Н45/2:

расчетный ток равен 14 А, выберем два автоматических выключателя типа LV426100 – номинальный ток выключателей 16 А, ток теплового расцепителя 16 А с уставкой срабатывания 0,7-1 номинала, ток отключения 600 А.

Автоматические выключатели для позиций Н49/1, Н49/2:

расчетный ток равен 8 А, выберем два автоматических выключателя типа LV426100 – номинальный ток выключателей 16 А, ток теплового расцепителя 16 А с уставкой срабатывания 0,7-1 номинала, ток отключения 600 А.

Автоматические выключатели для позиций Н53/1, Н53/2:

расчетный ток равен 72 А, выберем два автоматических выключателя типа LV426107 – номинальный ток выключателей 100 А, ток теплового расцепителя 100 А с уставкой срабатывания 0,7-1 номинала, ток отключения 1,5 кА.

Автоматические выключатели для позиций Н54/1, Н54/2:

расчетный ток равен 28,5 А, выберем два автоматических выключателя типа LV426102 – номинальный ток выключателей 32 А, ток теплового расцепителя 32 А, ток отключения 720А.

Автоматические выключатели для приточной вентиляции:

номинальный ток каждого электродвигателя равен 4 А, выберем к установке шесть автоматических выключателей типа LV426100 – номинальный ток

выключателей 16 А, ток теплового расцепителя 16 А с уставкой срабатывания 0,7-1 номинала, ток отключения 600 А.

Автоматические выключатели для вытяжной вентиляции:
номинальный ток каждого электродвигателя равен 1,4 А, выберем к установке восемь автоматических выключателей типа LV426100 – номинальный ток выключателей 16 А, ток теплового расцепителя 16 А с уставкой срабатывания 0,7-1 номинала, ток отключения 600 А.

Автоматические выключатели для аварийной вентиляции:
расчетный ток равен 230 А, выберем два автоматических выключателя типа LV431100 – номинальный ток выключателей 250 А, ток теплового расцепителя 250 А с уставкой 0,7-1 номинала, ток отключения 2,5 кА.

Автоматические выключатели для АТПОМ:
номинальный ток каждого АТПОМ равен 44 А, выберем к установке восемь автоматических выключателей типа LV426105 – номинальный ток выключателей 63 А, ток теплового расцепителя 63 А с уставкой срабатывания 0,7-1 номинала, ток отключения 960 А.

4.4 Выбор пусковой аппаратуры

К установке принимаем контакторы фирмы Schneider Electric, модель контактора подбирается исходя номинального тока электродвигателя.

Для электродвигателей с номинальным током $I_n=500\text{А}$ к установке примем контактор TeSys F LC1F500Q7.

Для электродвигателей с номинальным током $I_n=250\text{А}$ к установке примем контактор TeSys F LC1F150E5.

Для электродвигателей с номинальным током $I_n=80\text{А}$ к установке примем контактор TeSys F LC1DT80AQ7.

Для электродвигателей с номинальным током до $I_n=40\text{А}$ к установке примем контактор TeSys F LC1DT40Q7.

Для электродвигателей с номинальным током до $I_n=20\text{А}$ к установке примем контактор TeSys F LC1DT20Q7.

5 Расчет токов короткого замыкания

В ходе эксплуатации электроустановок могут возникать различные аварийные ситуации, в частности могут возникать КЗ различных видов с резким изменением тока в сети, исходя из этого следует подбирать оборудование устойчивое к токам короткого замыкания и учитывать величину этих токов.

Основной причиной возникновения КЗ может стать нарушение изоляции токоведущих частей в следствии механического воздействия, неквалифицированные действия обслуживающего персонала, а так же естественное старение изоляции либо ускоренное старение из-за нагрева проводников.

Для того чтобы уменьшить воздействие короткого замыкания либо предотвратить его стоит устранять причины вызывающие которые могут вызывать КЗ и применять быстродействующие выключатели. В современных электроустановках ударные токи короткого замыкания могут достигать опасно больших значений. Механические усилия, возникающие при этом, в отдельных токоведущих частях машин могут вызвать серьезные повреждения. Следовательно, все элементы электроустановки должны обладать достаточной прочностью, и быть устойчивыми к механическим усилиям, возникающим при появлении ударного тока КЗ.

Расчеты выполним в соответствии с методикой, рекомендованной ГОСТом 28249-93 для расчетов токов короткого замыкания в сетях до 1000В. КЗ рассчитаем в трех точках, показанных на схеме, изображенной на рисунке 1:

1. К1 – непосредственно в РУ 0,4 кВ на вводных контактах ЩСУ;
2. К2 – наиболее мощный из ближайших к ТП электроприемников;
3. К3 – наиболее удаленный от ТП электроприемник

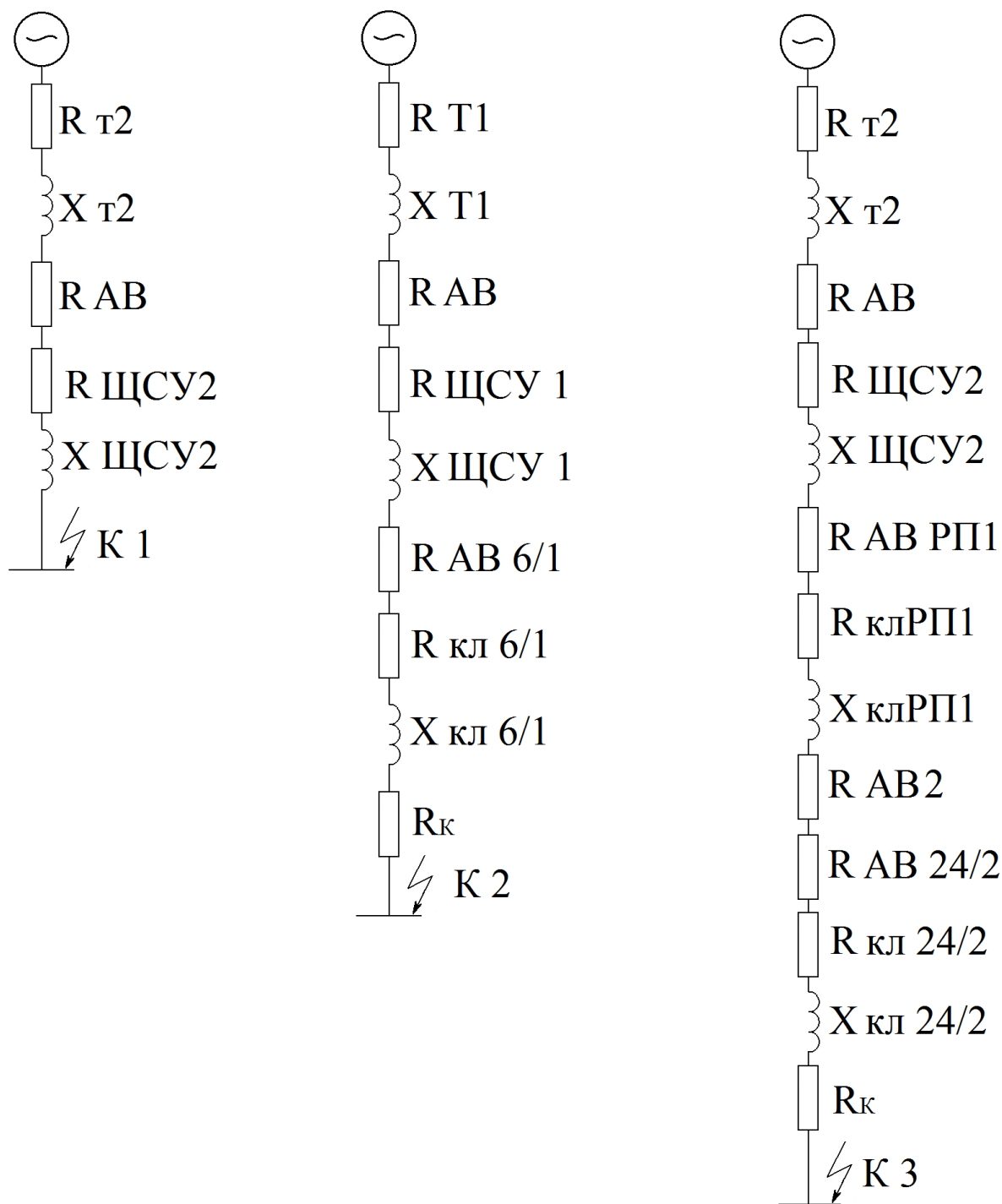


Рисунок 1 – Схема замещения

Параметры расчетной схемы будут следующими:

Трансформаторы Т1 и Т2 ТМЗ-1600/6/0,4:

$S_N=1600$ кВА, $U_{нн}=0,4$ кВ, $U_{нвн}=0,6$ кВ, $U_k= 6,2\%$, $\Delta P_{хх}=2,8$ кВт, $\Delta P_{кз}=14$ кВт.

«Рассчитаем активное, полное и реактивное сопротивление трансформатора» [2., с 61] по формулам:

$$r_T = \frac{P_{кз} \cdot U_{ннн}^2}{S_H^2} \cdot 10^6 = \frac{14,0,4^2}{1600^2} \cdot 10^6 = 0,875 \text{ мОм} \quad (36)$$

$$z_T = \frac{U_{кз} \cdot U_{ннн}^2}{S_H} \cdot 10^4 = \frac{6,2 \cdot 0,4^2}{1600} \cdot 10^4 = 6,2 \text{ мОм} \quad (37)$$

$$x_T = \sqrt{z_T^2 - r_T^2} = \sqrt{6,2^2 - 0,875^2} = 17,1 \text{ мОм} \quad (38)$$

Расчет сопротивлений для шинпровода ЩСУ1 и ЩСУ2:

SchneiderElectric тип КТС4000ER41, $I_n = 3359,72 \text{ А}$, $r_0 = 0,0011 \text{ мОм/м}$, $x_0 = 0,0009 \text{ мОм/м}$ $z_0 = 0,014 \text{ мОм/м}$, $L = 10 \text{ м}$.

Рассчитаем активное и реактивное сопротивление шинпровода, используя формулы:

$$r_{\text{ЩСУ}} = r_0 \cdot L = 0,0011 \cdot 10 = 0,011 \text{ мОм} \quad (39)$$

$$x_{\text{ЩСУ}} = x_0 \cdot L = 0,0009 \cdot 10 = 0,009 \text{ мОм} \quad (40)$$

Расчет сопротивлений кабельной линии питания позиции В6/1.

Длина кабельной линии $L = 45 \text{ м}$, удельные сопротивления берем из каталога $r_0 = 3,09 \text{ мОм/м}$, $x_0 = 0,09 \text{ мОм/м}$;

Рассчитаем активное и реактивное сопротивление всей линии:

$$r_{\text{кл 6/1}} = r_0 \cdot L = 3,09 \cdot 45 = 139,05 \text{ мОм} ;$$

$$x_{\text{кл 6/1}} = x_0 \cdot L = 0,09 \cdot 45 = 4,05 \text{ мОм} .$$

Расчет сопротивлений кабельной линии питания РП1.

Длина кабельной линии $L = 85 \text{ м}$, удельные сопротивления берем из каталога $r_0 = 0,34 \text{ мОм/м}$, $x_0 = 0,0602 \text{ мОм/м}$;

Рассчитаем активное и реактивное сопротивление всей линии:

$$r_{\text{кл.РП1}} = r_0 \cdot L = 0,34 \cdot 85 = 28,9 \text{ мОм};$$

$$x_{\text{кл.РП1}} = x_0 \cdot L = 0,0602 \cdot 85 = 5,117 \text{ мОм}.$$

Расчет сопротивлений кабельной линии питания позиции Н24/2.

Длина кабельной линии $L=27\text{м}$, удельные сопротивления берем из каталога $r_0=7,4 \text{ мОм/м}$, $x_0=0,116 \text{ мОм/м}$;

Рассчитаем активное и реактивное сопротивление всей линии:

$$r_{\text{кл.24/2}} = r_0 \cdot L = 7,4 \cdot 27 = 199,8 \text{ мОм};$$

$$x_{\text{кл.24/2}} = x_0 \cdot L = 0,126 \cdot 27 = 3,132 \text{ мОм}.$$

«Сопротивление контактов коммутационных аппаратов, контактных соединений кабелей и активное сопротивление дуги в месте КЗ принимаем в соответствии с ГОСТ 28249-93» [8]:

$r_{\text{к}} = 0,1 \text{ мОм}$ – для контактных соединений кабелей;

$r_{\text{АВ}} = 1 \text{ мОм}$ – для контактов коммутационных аппаратов.

5.1 Выполним расчет для точки К 1

Ток металлического трехфазного КЗ найдем по формуле:

$$I_{\text{мкз}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ннн}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}^1} = \frac{U_{\text{ннн}}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}} \quad (41)$$

Суммируем сопротивления всех элементов до точки короткого замыкания К 1:

$$R_{1\Sigma} = r_{\text{Т2}} + r_{\text{АВ}} + r_{\text{ЩСВ2}} = 0,875 + 1 + 0,011 = 1,886 \text{ мОм} \quad (42)$$

$$X_{1\Sigma} = x_{\text{Т2}} + x_{\text{ЩСВ2}} = 17,1 + 0,009 = 17,109 \text{ мОм} \quad (43)$$

Найдем суммарное полное сопротивление до точки КЗ по формуле:

$$Z_{1\Sigma} = \sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2} = \sqrt{1,886^2 + 17,109^2} = 17,21 \text{ мОм} \quad (44)$$

$$I_{\text{мкз}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ннн}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}} = \frac{400}{1,73 \cdot 18,09} = 12,78 \text{ кА} \quad (45)$$

«Ток трехфазного дугового КЗ определим с использованием снижающего коэффициента K_c » [2., с 68].

Выполним расчет дугового трехфазного короткого замыкания:

Найдем значение снижающего коэффициента для начального момента КЗ (K_{C1}) и для установившегося КЗ (K_{C2}) по [2., с 68]:

при $Z_{1\Sigma} = 17,21 \text{ мОм}$ $K_{C1} = 0,67$ $K_{C2} = 0,56$.

Ток трехфазного дугового КЗ определим по формуле:

$$I_{\text{дкз}}^{(3)} = I_{\text{мкз}}^{(3)} \cdot K_c \quad (46)$$

$$I_{\text{дкз}}^{(3)} = 13,43 \cdot 0,67 = 9 \text{ кА при } t_{\text{кз}} = 0 \text{ сек}$$

$$I_{\text{дкз}}^{(3)} = 13,43 \cdot 0,56 = 7,52 \text{ кА при } t_{\text{кз}} > 0,05 \text{ сек}$$

Ударный ток КЗ найдем по формуле:

$$I_y = K_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{мкз}}^{(3)} \quad (47)$$

«Ударный коэффициент K_y определяем по графику зависимости ударного коэффициента от постоянной времени» [2., с 52].

Вычислим соотношение X_{Σ} к R_{Σ} :

$$\frac{X_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} = \frac{17,109}{1,886} = 9,07 \quad (48)$$

Этому отношению соответствует $K_y=1,7$.

Найдем ударный ток КЗ:

$$I_y = K_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{МКЗ}}^{(3)} = 1,7 \cdot \sqrt{2} \cdot 13,43 = 32,29 \text{ кА}$$

5.2 Выполним расчет для точки К 2

Ток металлического трехфазного КЗ найдем по формуле:

$$I_{\text{МКЗ}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ннн}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}^1} = \frac{U_{\text{ннн}}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}}$$

Суммируем сопротивления всех элементов до точки короткого замыкания К 1:

$$R_{1\Sigma} = r_{\text{Т1}} + r_{\text{АВ}} + r_{\text{ЩСУ1}} + r_{\text{АВ 6/1}} + r_{\text{кл 6/1}} + r_{\text{К}} = 0,875 + 1 + 0,011 + 1 + 3,09 + 0,1 = 6,076 \text{ МОм}$$

$$X_{1\Sigma} = x_{\text{Т1}} + x_{\text{ЩСУ1}} + x_{\text{кл 6/1}} = 17,1 + 0,009 + 0,09 = 17,199 \text{ МОм}$$

Найдем суммарное полное сопротивление до точки КЗ по формуле:

$$Z_{1\Sigma} = \sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2} = \sqrt{6,076^2 + 17,199^2} = 18,2 \text{ МОм}$$

$$I_{\text{МКЗ}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ннн}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}} = \frac{400}{1,73 \cdot 18,2} = 12,7 \text{ кА}$$

«Ток трехфазного дугового КЗ определим с использованием снижающего коэффициента K_c » [2., с 68].

Выполним расчет дугового трехфазного короткого замыкания:

Найдем значение снижающего коэффициента для начального момента КЗ (K_{C1}) и для установившегося КЗ (K_{C2}) по [2., с 68]:

при $Z_{1\Sigma} = 18,2$ мОм $K_{C1} = 0,67$ $K_{C2} = 0,56$.

Ток трехфазного дугового КЗ определим по формуле:

$$I_{дкз}^{(3)} = I_{мкз}^{(3)} \cdot K_C$$

$$I_{дкз}^{(3)} = 12,7 \cdot 0,67 = 8,5 \text{ кА при } t_{кз} = 0 \text{ сек}$$

$$I_{дкз}^{(3)} = 11,6 \cdot 0,56 = 6,5 \text{ кА при } t_{кз} > 0,05 \text{ сек}$$

Ударный ток КЗ найдем по формуле:

$$I_y = K_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{мкз}^{(3)}$$

«Ударный коэффициент K_y определяем по графику зависимости ударного коэффициента от постоянной времени» [2., с 52].

Вычислим соотношение X_Σ к R_Σ :

$$\frac{X_\Sigma}{R_\Sigma} = \frac{17,199}{6,076} = 2,8$$

Этому соотношению соответствует $K_y = 1,35$.

Найдем ударный ток КЗ:

$$I_y = K_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{мкз}^{(3)} = 1,35 \cdot \sqrt{2} \cdot 12,7 = 24,3 \text{ кА}$$

5.3 Выполним расчет для точки КЗ

Ток металлического трехфазного КЗ найдем по формуле:

$$I_{\text{мкз}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ннн}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}^1} = \frac{U_{\text{ннн}}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}}$$

Суммируем сопротивления всех элементов до точки короткого замыкания К 1:

$$\begin{aligned} R_{1\Sigma} &= r_{T2} + r_{AB} + r_{\text{ЩСУ}2} + r_{\text{АВРП}1} + r_{\text{клРП}1} + r_{\text{АВ}2} + r_{\text{АВ}24/1} + r_{\text{кл}24/2} + r_{\text{К}} \\ &= 0,875 + 1 + 0,011 + 1 + 28,9 + 1 + 1 + 199,8 + 0,1 = 233,69 \text{ мОм} \end{aligned}$$

$$X_{1\Sigma} = x_{T2} + x_{\text{ЩСУ}2} + x_{\text{клРП}1} + x_{\text{кл}24/2} = 17,1 + 0,009 + 5,117 + 3,132 = 25,36 \text{ мОм}$$

Найдем суммарное полное сопротивление до точки КЗ по формуле:

$$Z_{1\Sigma} = \sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2} = \sqrt{233,69^2 + 25,36^2} = 235 \text{ мОм}$$

$$I_{\text{мкз}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ннн}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}} = \frac{400}{1,73 \cdot 2367} = 0,98 \text{ кА}$$

«Ток трехфазного дугового КЗ определим с использованием снижающего коэффициента K_c » [2., с 68].

Выполним расчет дугового трехфазного короткого замыкания:

Найдем значение снижающего коэффициента для начального момента КЗ (K_{C1}) и для установившегося КЗ (K_{C2}) по [2., с 68]:

при $Z_{1\Sigma} = 235 \text{ мОм}$ $K_{C1} = 0,96$ $K_{C2} = 0,85$.

Ток трехфазного дугового КЗ определим по формуле:

$$I_{\text{дкз}}^{(3)} = I_{\text{мкз}}^{(3)} \cdot K_c$$

$$I_{\text{дкз}}^{(3)} = 0,98 \cdot 0,96 = 0,94 \text{ кА при } t_{\text{кз}} = 0 \text{ сек}$$

$$I_{\text{дкз}}^{(3)} = 0,98 \cdot 0,85 = 0,83 \text{ кА при } t_{\text{кз}} > 0,05 \text{ сек}$$

Ударный ток КЗ найдем по формуле:

$$I_y = K_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{MK3}^{(3)}$$

«Ударный коэффициент K_y определяем по графику зависимости ударного коэффициента от постоянной времени» [2., с 52].

Вычислим соотношение X_Σ к R_Σ :

$$\frac{X_\Sigma}{R_\Sigma} = \frac{233,69}{25,36} = 9,21$$

Этому соотношению соответствует $K_y=1,7$.

Найдем ударный ток КЗ:

$$I_y = K_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{MK3}^{(3)} = 1,7 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,98 = 2,4 \text{ кА}$$

6 Выбор оборудования для КТП на стороне 0,4 кВ

6.1 Выбор вводного выключателя

В целях унификации оборудования, сокращения затрат на логистику и сокращение времени поставки оборудования и комплектующих к установке предлагается автоматический выключатель той же фирмы, что и для остальных потребителей, SchneiderElectric модель Masterpact MTZ2 40 N1. Проверим выбранный выключатель по следующим параметрам:

1. По номинальному напряжению, используя формулу:

$$\begin{aligned}U_{уст} &\leq U_{ном}, \\0,4кВ &\leq 1кВ.\end{aligned}\tag{49}$$

2. По номинальному току:

$$I_p \leq I_n \tag{50}$$

$$I_p = 1,4 \cdot \frac{S_T}{\sqrt{3} \cdot U_n} = 1,4 \cdot \frac{1600}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 3233A \leq I_n = 4000A \tag{51}$$

3. По конструктивному исполнению:

- непрерывный рабочий ток $I_n = 2500$ А;
- настраиваемый расцепитель перегрузки $(0,4 - 1) I_n$;
- настраиваемый расцепитель КЗ $(1,5 - 10) I_n$;
- выключающая способность – 66 кА.

Для секционного выключателя выбираем модель аналогичную вводному.

6.2 Выбор трансформатора тока

К установке принимает трансформатор тока METSECT5DC400 фирмы SchneiderElectric.

Проверим выбранный трансформатор тока по следующим параметрам:

1. Номинальному напряжению, используя формулу (49).
2. Номинальному рабочему току, по формулам (50), (51).
3. По электродинамической стойкости:

$$i_{y\partial} \leq K_{\partial\partial} \cdot \sqrt{2} \cdot I_n \quad (52)$$

$$32,29 \text{ кА} \leq 20 \cdot \sqrt{2} \cdot 4000$$

$$32,29 \text{ кА} \leq 112,8 \text{ кА}$$

4. По термической стойкости:

$$B_K \leq K_T^2 \cdot I_n^2 \cdot t_T = I_T^2 \cdot t_T \quad (53)$$

$$16,9 \text{ кА}^2 \cdot c \leq 63 \text{ кА}^2 \cdot c$$

7 Расчет заземления подстанции

Все металлические части, находящиеся в электроустановке и не находящиеся при нормальном режиме под напряжением, во избежание поражения обслуживающего персонала электрическим током, должны быть заземлены.

Найдем сопротивление фундамента здания, являющимся естественным заземлителем, по формуле:

$$R_e = \rho_{гр} \cdot (0,5 \cdot \sqrt{S}) = 50 \cdot (0,5 \cdot \sqrt{200}) = 353 \text{ Ом} \quad (54)$$

где $\rho_{гр}=50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ – удельное сопротивление верхнего слоя земли, S – примерная общая площадь фундаментов.

Из-за того что сопротивление естественного заземления фундамента слишком велико, требуется монтаж заземляющего устройства.

Заземление выполним с помощью вертикальных заземлителей в виде труб и стальных полос, соединенных в единый контур.

Допустимое напряжение прикосновения принимаем $U_{пр} = 500\text{В}$

Рассчитаем коэффициент напряжения прикосновения по следующей формуле:

$$k_{п} = \frac{M \cdot \beta}{\left(\frac{L_B \cdot L_{Г}}{a \sqrt{S}}\right)^{0,45}} = \frac{0,5 \cdot 0,86}{\left(\frac{6 \cdot 733,5}{0,5 \cdot \sqrt{1749}}\right)^{0,45}} = 0,038 \quad (55)$$

где $L_B = 6$ – длина трубы (вертикального заземлителя), $L_{Г} = 733,5 \text{ м}$ – длина горизонтальных заземлителей, $a=0,5$ – расстояние между вертикальными заземлителями, $S = 1024 \text{ м}^2$ – площадь всего заземляющего устройства, « $M=0,5$ – параметр который зависит от отношения ρ_1/ρ_2 » [2. с 96], β – коэффициент сопротивления тела человека рассчитанный по формуле:

$$\beta = \frac{R_{\text{ч}}}{R_{\text{ч}} + R_{\text{с}}} = \frac{1000}{1000 + 1,5 \cdot 50} = 0,93 \quad (56)$$

Для расчетов примем $R_{\text{ч}}=1000$ Ом – сопротивление тела человека, $R_{\text{с}}=1,5 \cdot \rho_{\text{в.с.}}$ - сопротивление под ступнями человека.

Общее сопротивление заземляющего устройства рассчитаем по формуле:

$$R_3 = A \cdot \frac{\rho_{\text{гр}}}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_{\text{гр}}}{L_{\text{г}} + L_{\text{в}}} \quad (57)$$

где $A = (0,385 - 0,25 \cdot \frac{L_{\text{в}} + t}{\sqrt{S}})$, t – глубина расположения горизонтальных заземлителей, S – общая площадь заземлителя, $\rho_{\text{гр}}$ – сопротивление грунта, $L_{\text{г}}$ – общая длина горизонтальных заземлителей, $L_{\text{в}}= L_{\text{в}} \cdot n$ – общая длина вертикальных заземлителей состоящая из количества заземлителей умноженных на их длину.

Далее подставим значения в формулу:

$$R_3 = (0,385 - 0,25 \cdot \frac{6 + 0,7}{\sqrt{1749}}) \cdot \frac{50}{\sqrt{1749}} + \frac{50}{733,5 + 6 \cdot 200} = 0,44$$

Найдем общее сопротивление подстанции по формуле:

$$R_3' = \frac{R_3 \cdot R_{\text{е}}}{R_3 + R_{\text{е}}} = \frac{0,44 \cdot 2}{0,44 + 2} = 0,35 \text{ Ом} \quad (58)$$

Рассчитаем напряжение прикосновения при наибольшем токе кз на землю используя полученные ранее значения, по формуле:

$$U_{\text{пр}} = k_{\text{п}} \cdot I_{\text{мкз}}^{(3)} \cdot R_3' = 0,038 \cdot 12700 \cdot 0,35 = 169 \text{ В} \quad (59)$$

«Полученное значение меньше $U_{\text{пр}} = 500\text{В}$, следовательно требования к заземлению подстанции удовлетворяются» [4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы мы рассчитали предполагаемые электрические нагрузки, максимальная потребляемая полная мощность составила 2211,3 кВА. Выбрали на основе предполагаемой потребляемой мощности, необходимое количество трансформаторов подходящих по мощности и классу напряжения: ТП будет состоять из двух трансформаторов ТМЗ-1600/6/0,4. Подсчитали необходимую протяженность кабельных линий и выбрали подходящие сечения проводников для питания электроприемников. Рассчитали необходимое сечение шинпровода для ЩСУ и приняли к установке шинпровод фирмы SchneiderElectric тип КТС4000ER41. Была составлена схема замещения и рассчитаны токи короткого замыкания в трех точках, самый большой ток трехфазного КЗ будет на шинпроводе в РУ и составит 13,43 кА.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Правила устройства электроустановок. – 7-е издание. СПб.: Энергоатомиздат. 2013.
2. Правила технической эксплуатации электростанций и подстанций. М.: Энергоатомиздат. 2013.
3. Вахнина В.В., Черненко А.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов. Учебное – методическое пособие для практических занятий и курсового проектирования студентов всех форм обучения специальностей. ТГУ г. Тольятти, 2007. 54 с.
4. Вахнина В.В., Горячева В.Л., Степкина Ю.В. Проектирование система электроснабжения машиностроительных предприятий. Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования. ТГУ г. Тольятти 2004. 93с.
5. Назаров А.И. Расчет мощности и выбор силовых трансформаторов подстанций горных предприятий. Методическое пособие. г. Кировск 2017. 13с.
6. Вахнина В.В. Компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий. Учебное пособие. ТГУ г. Тольятти 2011. 69 с.
7. Шеховцов В.П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению. ФОРУМ 2011. 137 с.
8. Магистральные шинопроводы переменного тока [Электронный ресурс]: Компания Омега. URL <http://comega.ru/produkcija/224/catalog1-88f.html> (дата обращения 27.03.19).
9. Афонин В.В., Набатов К.А. Электрические станции и подстанции. Часть 1. Электрические станции и подстанции. Учебное пособие. - Тамбов: Изд-во Тамбовского гос. тех. университета, 2015. - 90 с.

10. Балаков Ю.Н., Мисриханов М.Ш., Шунтов А.В. Проектирование схем электроустановок: учебное пособие для вузов. - М.: Издательский дом МЭИ, 2016. - 288 с.
11. Кабельный справочник [Электронный ресурс]: Кабельная поисковая система. URL: [https://k-ps.ru/spravochnik/kabeli-silovye/s-pvx-izolyacziej-\(0,66;-1kv\)/avbbshv/](https://k-ps.ru/spravochnik/kabeli-silovye/s-pvx-izolyacziej-(0,66;-1kv)/avbbshv/) (дата обращения 28.03.19).
13. РФ. Росстандарт. ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ : от 21.11.2012. М., 1993. 47 с.
14. Каталог продукции [Электронный ресурс]: Schneider Electric. URL: <https://www.se.com/ru/ru/all-products> (дата обращения 12.05.19).
15. Каталог электрооборудования «Электрощит» [Электронный ресурс]: «Электрощит». URL: <https://electroshield.ru> (дата обращения 12.05.19).
- 16 Салтыкова О.А. Релейная защита понизительной трансформаторной подстанции. Учебное пособие. ТГУ г.Тольятти., 2007. 47 с.
17. Bhalja B., Maheshwari R. P., Chothani N. Protection and Switchgear (Oxford Higher Education). - 1 изд. - Oxford: Oxford University Press, 2016. - 576 с.
18. Croft T., Hartwell F.P., Summers W.I. American Electricians' Handbook. - 16 изд. - New York City: McGraw-Hill Education, 2013. - 1712 с.
19. Gönen T. Electric Power Distribution Engineering. - 3 изд. - Boca Raton: CRC Press, 2014. - 1061 с.
20. McPartland J.F., McPartland B.J., McPartland S.P. McGraw-Hill's Handbook of Electric Construction Calculations. - New York City: McGraw-Hill Professional Publishing, 2013. - 320 с.
21. Ram B. Power System Protection and Switchgear. - New York City: McGraw-Hill Professional Publishing, 2011. - 684 с.