

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ 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, специальности)

Электроснабжение
(направленность (профиль)/специализация)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему «Электроснабжение моторного завода»

Студент

Д.А. Фомин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

А.Н. 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)

« ____ » _____ 2018 г.

Тольятти 2018

Аннотация

Темой бакалаврской работы является электроснабжение моторного завода.

В работе были произведены следующие расчеты: выполнено определение значений расчетных нагрузок по цехам завода; выбраны количество и мощность трансформаторов цеховых подстанций; по суммарной общезаводской нагрузке определена мощность силовых трансформаторов на ГПП; выбрана схема внутризаводского распределения электрической энергии; определены значения токов короткого замыкания, по которым было проверено основное электрооборудование ГПП; выполнен расчет заземления главной понизительной подстанции.

Бакалаврская работа состоит из пояснительной записки на 58 листах, которая содержит 4 таблицы и 2 рисунка. Графическая часть работы выполнена на 6 листах формата А1.

Содержание

Введение	4
1 Характеристика объекта проектирования	6
2 Расчет ожидаемых максимальных нагрузок по цехам	8
3 Определение необходимого числа и номинальной мощности силовых трансформаторов цеховых КТП	13
4 Определение необходимого числа и номинальной мощности силовых трансформаторов главной понизительной подстанции	21
5 Выбор схемы ГПП	31
6 Расчет токов короткого замыкания	32
7 Выбор и проверка основного электрооборудования на главной понизительной подстанции	36
8 Расчет заземления ГПП	52
Заключение	55
Список используемых источников	56

Введение

Система электроснабжения промышленного предприятия является частью электроэнергосистемы и частью процесса производства самого предприятия. Электрическая энергия, поступающая в систему электроснабжения промпредприятия, является одной из составляющих производства наряду с другими ресурсами и материалами.

К внешнему электроснабжению промышленного предприятия относят электроустановки, расположенные от узловой распределительной подстанции электроэнергосистемы до понизительной подстанции предприятия. Система внешнего электроснабжения предприятия чаще всего выполняется на номинальном напряжении 35-220 кВ.

Система внутреннего электроснабжения промпредприятия обычно характеризуется сложной структурой и значительной длиной распределительных сетей предприятия. В систему внутреннего электроснабжения входят высоковольтные воздушные и кабельные линии, распределительные пункты и цеховые трансформаторные подстанции. Для распределения электроэнергии по территории предприятия используют номинальные напряжения 6-10 кВ.

К системе внутрицехового электроснабжения предприятия относятся внутрицеховые сети от трансформаторной подстанции до электроприемников. Для распределения электроэнергии внутри цеха применяются номинальные напряжения 380-660 В. Для питания отдельных электроприемников могут применяться нестандартные значения напряжений. Система внутрицехового электроснабжения в основном выполняется с глухозаземленной нейтралью, что позволяет получить два класса напряжения 380 В для питания большинства промышленных электроприемников (ЭП) и 220 В для питания однофазных ЭП и сетей освещения [1-4].

Правильно выполненные расчеты позволяют выбрать оптимальные параметры электрических сетей предприятия, обеспечить возможность их

дальнейшего развития при соблюдении баланса надежности и экономичности [5, 6].

Целью бакалаврской работы является проектирование системы электроснабжения моторного завода, позволяющей выполнить заданные требования по надежности электроснабжения потребителей при минимальных потерях электроэнергии.

1 Характеристика объекта проектирования

Моторный завод в Белгородской области был создан с целью полного освоения производства модельного ряда массовых сельскохозяйственных дизельных двигателей СМД.

Предприятие осуществляет гарантийное и послегарантийное обслуживание двигателей СМД, находится в тесном сотрудничестве с производителями сельхозтехники, спецтехники и электроагрегатов.

Дизельный двигатель СМД доступен по цене, прост в техническом обслуживании и ремонте, вынослив, надёжен и неприхотлив. При грамотной эксплуатации и регулярном техническом обслуживании, моторесурс до капремонта составляет 10000 моточасов. Не нуждается в создании новых сервисных центров, так как на территории одной только России больше ста специализированных предприятий по ремонту двигателей СМД. Мощностной диапазон двигателей от 50 до 200 кВт. Запуск от пускового двигателя или электростартера. Данный тип двигателей был разработан специально для сельскохозяйственной и спец- техники, которая требует высокий вращающий момент при низких оборотах. Постоянными потребителями двигателей СМД были такие страны как Индия, Куба, Америка, Болгария, Венгрия, Румыния, Египет, Швеция, Канада, Китай, Австралия.

СМД (средней мощности дизель) доказал на деле свою работоспособность при грамотной эксплуатации. Использование данного типа двигателей в качестве силового агрегата к сельхозтехнике, спецтехнике, мобильных энергоустановок имеет широчайшие перспективы. Финансовый кризис показал, что такие двигатели стали особенно востребованы в тяжелый период.

Привлечение частного капитала в данное производство обеспечивает качество выпускаемой продукции, неподдельное стремление к развитию и материальную ответственность каждого специалиста, участвующего в технологическом процессе.

Стратегической задачей предприятия является организовать механическую обработку 90% корпусных деталей двигателя на собственном производстве. Существующая конструкторская документация позволяет постоянно осваивать мехобработку новых позиций. На сегодняшний день освоен полный цикл производства следующих деталей двигателя: шестерни газораспределения, топливопроводы высокого и низкого давления, картер маховика, шкивы, маховики, коллекторы выпускные, шестерня привода магнето, втулка клапана направляющая.

В настоящее время ведётся работа по подготовке производства деталей из алюминиевых сплавов (патрубки, коллекторы водяные, различные корпуса), вентиляторов двигателей (с заменой технологии производства и материала изготовления), блока-картера к двигателю СМД нового поколения, с использованием нанотехнологий в литейных материалах и 3D технологии построения моделей-прототипов. Рассматривается вопрос целесообразности комплектации двигателей подшипниками фирмы SKF. Испытания двигателей СМД-14, 17, 18, 20Т-04 с топливными насосами фирмы МОТОРПАЛ (Чехия) показали значительное снижение расхода топлива, выброса вредных веществ в атмосферу, увеличение продолжительности безотказной работы дизеля. Достигнута договорённость с фирмой МОТОРПАЛ о возможной разработке топливных насосов к двигателям СМД-60, 62.

Достижениями предприятия являются:

- оперативность выполнения заказов и особое внимание каждому клиенту;
- узкая специализация производства – выпуск двигателей и запчастей к СМД;
- расход топлива у выпускаемых двигателей на 30–40% меньше отечественных аналогов при экологической безопасности на 20–30% лучше установленной в нормах;
- сертификация продукции.

2 Расчет ожидаемых максимальных нагрузок по цехам

Основой для рационального выбора элементов системы электроснабжения является достоверное нахождение расчетных электрических нагрузок, от которых зависят параметры всех элементов системы электроснабжения без исключения [7, 8].

На первом этапе при проектировании системы электроснабжения определяются электрические нагрузки.

Расчетной называется такая неизменная во времени нагрузка, которая оказывает такой же тепловой эффект, что и реальная, изменяющаяся во времени нагрузка.

По значению расчетной нагрузки выбирается и проверяется электрическое оборудование, определяется требуемая мощность источников питания, рассчитываются сечения жил проводников, определяется номинальная мощность силовых трансформаторов и преобразователей, по которой в свою очередь рассчитываются потери напряжения и мощности [9, 10].

Расчет ожидаемых электрических нагрузок выполняем в следующей последовательности [11]:

Коэффициенты использования и мощности для каждого из цехов определяем по таблицам «средние значения коэффициентов использования и коэффициентов мощности по отдельным цехам» в справочной литературе.

Определив значения $K_{И}$ для каждого из цехов необходимо определить групповой коэффициент использования, который находится по следующей формуле:

$$K_{И.гр} = \frac{\sum P_{СМ}}{\sum P_{Н.Σ}} \quad (2.1)$$

Определяем среднесменную активную и реактивную составляющую мощности по следующим формулам:

$$P_{CM} = K_{II} \cdot P_{H.\Sigma}, \quad (2.2)$$

$$Q_{CM} = P_{CM} \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (2.3)$$

где $\operatorname{tg} \varphi$ - определяется из известного значения косинуса по тригонометрическим формулам.

Для $\operatorname{tg} \varphi$ в итоговой строке также необходимо определить среднее значение, его можно рассчитать по следующей формуле:

$$\operatorname{tg} \varphi_{cp} = \frac{\sum Q_{CM}}{\sum P_{CM}} \quad (2.4)$$

Коэффициент максимума K_M определяется по справочной таблице из учебно-методического пособия, в зависимости от n_{Σ} и K_{II} .

Расчетную активную и реактивную нагрузку по каждому цеху рассчитываем по следующим формулам:

$$P_P = K_M \cdot \sum P_{CM}; \quad (2.5)$$

$$Q_P = \sum Q_{CM} - \text{если } n_{\Sigma} > 10; \quad (2.6)$$

$$Q_P = 1.1 \cdot \sum Q_{CM} - \text{если } n_{\Sigma} \leq 10. \quad (2.7)$$

Определяем суммарную активную нагрузку цеха с учетом мощности системы внутреннего освещения.

Полная расчетная мощность S_P рассчитываем по следующей формуле:

$$S_P = \sqrt{P_P^2 + Q_P^2}. \quad (2.8)$$

Расчетный ток определяем по формуле:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_H} \quad (2.9)$$

Расчеты для высоковольтных электроприемников выполняем аналогичным образом.

Итоговые значения расчетной мощности по предприятию в целом получаем путем суммирования итоговой нагрузки 0,4 кВ и нагрузки 6-10 кВ.

Результаты расчетов электрических нагрузок сводим в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Расчет ожидаемых максимальных электрических нагрузок по цехам

№ цеха на плане предприятия	P_n , кВт	$P_{н.э.}$, кВт	$n_э$	K_u	$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	P_c , кВт	Q_c , квар	K_M	P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА
1	3650	34.76	105	0.26	0.73	0.94	949	888.48	1.1	1043.90	888.48	1370.81
2	11200	37.33	300	0.31	0.62	1.27	3472	4393.77	1.03	3576.16	4393.77	5665.17
3	8310	29.68	280	0.33	0.75	0.88	2742.3	2418.48	1.03	2824.57	2418.48	3718.50
4	150	7.50	20	0.37	0.65	1.17	55.5	64.89	1.21	67.16	71.38	98.00
5	4430	18.85	235	0.43	0.75	0.88	1904.9	1679.96	1.03	1962.05	1679.96	2583.00
6	3310	23.64	140	0.42	0.8	0.75	1390.2	1042.65	1.04	1445.81	1146.92	1845.47
7	4730	63.07	75	0.39	0.7	1.02	1844.7	1881.97	1.1	2029.17	2070.17	2898.81
8	8210	52.97	155	0.36	0.7	1.02	2955.6	3015.32	1.05	3103.38	3316.85	4542.29
9	7880	53.24	148	0.43	0.75	0.88	3388.4	2988.29	1.04	3523.94	3287.12	4819.05

Продолжение таблицы 2.1

№ цеха на плане предприятия	P_n , кВт	$P_{н.э.}$, кВт	$n_э$	K_u	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$	P_c , кВт	Q_c , квар	K_M	P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА
10	860	27.74	31	0.34	0.6	1.33	292.4	389.87	1.18	345.03	428.85	550.42
11	390	19.50	20	0.68	0.8	0.75	265.2	198.90	1.11	294.37	218.79	366.78
Итого по 0,4 кВ	53120	7.5...63.07	1509	0.36	-	0.98	19260	18962.5	-	20215.53	19920.7	28381.4
7	500	250	2	0.33	0.72	0.96	165	159.04	2.1	346.50	159.04	381.25
8	3750	1250	3	0.48	0.8	0.75	1800	1350.0	1.65	2970.00	1350.00	3262.42
9	3150	630	5	0.47	0.85	0.62	1480.5	917.53	1.55	2294.78	917.53	2471.41
Итого по 10 кВ	7400	250...1250	10	0.47	-	0.70	3445.5	2426.5	-	5611.28	2426.57	6113.48
Всего по предприятию	60520	7.5...1250	1516	0.38	-	0.94	22706	21389.1	-	25826.8	22347.3	34152.9

3 Определение необходимого числа и номинальной мощности силовых трансформаторов цеховых КТП

3.1 Выбор трансформаторов КТП на примере моторного цеха №1

Найдем необходимую мощность силового трансформатора КТП по формуле [12]:

$$S_{HT} > \frac{P_{p\Sigma}}{K_3 N_T}, \quad (3.1)$$

$$S_{HT} > \frac{1962}{0,7 \cdot 2} = 1401 \text{ кВА.}$$

По шкале номинальных мощностей трансформаторов выбираем самое близкое большее значение $S_{HT} = 1600 \text{ кВА}$.

3.1.1 Вариант с силовым трансформатором ТМГ-1600

По данным производителя силового трансформатора определяем его паспортные данные: $\Delta P_{XX} = 2.1 \text{ кВт}$, $\Delta P_{K3} = 16.5 \text{ кВт}$, $i_{XX} = 0.5 \%$, $u_{K3} = 6 \%$, $K_T = 736 \text{ тыс. руб.}$

Произведем расчет потерь в трансформаторе:

$$\Delta P_{mp} = N_T \cdot (P_{XX} + K_3^2 \cdot P_{K3}), \quad (3.2)$$

$$\Delta P_{mp} = 2 \cdot 2.1 + 0.7^2 \cdot 16.5 = 20.37 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_{mp} = N_T \cdot (i_0 + K_3^2 \cdot U_{K3}) \cdot \frac{S_H}{100}, \quad (3.3)$$

$$\Delta Q_{mp} = 2 \cdot 0.5 + 0.7^2 \cdot 6 \cdot \frac{1600}{100} = 110.08 \text{ квар.}$$

Найдем расчётную нагрузку цеха с учётом потерь активной и реактивной мощности в силовом трансформаторе:

$$P_p = P_{p\Sigma} + \Delta P_T, \quad (3.4)$$

$$P_p = 1962 + 20.37 = 1982.4 \text{ кВт},$$

$$Q_p = Q_{p\Sigma} + \Delta Q_T, \quad (3.5)$$

$$Q_p = 1680 + 110.08 = 1790 \text{ квар.}$$

Рассчитаем реактивную мощность в период минимальных нагрузок [13]:

$$Q_{\min} = 50\% \cdot Q_p, \quad (3.6)$$

$$Q_{\min} = 0.5 \cdot 1790 = 895 \text{ квар.}$$

Определим экономически выгодное значение реактивной мощности в период максимальных нагрузок в энергосистеме:

$$Q'_{\text{э1}} = Q_p - 0,7 Q_{\text{сд}}, \quad (3.7)$$

$$Q'_{\text{э1}} = 1790 - 0.7 \cdot 0 = 1790 \text{ квар},$$

$$Q''_{\text{э1}} = \alpha \cdot P_p, \quad (3.8)$$

$$Q''_{\text{э1}} = 0.28 \cdot 1982.4 = 555.1 \text{ квар.}$$

где $\alpha = 0,28$; $Q_{\text{сд}} = 0$.

Принимаем наименьшее значение $Q_{\text{э1}} = 555.1 \text{ квар}$.

Определим экономически целесообразные значения реактивной мощности в часы минимальных нагрузок [14]:

$$Q_{\text{э2,в}} = Q_{\min} - Q_{\text{кд}} = Q_{\min} - (Q_p - Q_{\text{э1}}), \quad (3.9)$$

$$Q_{\text{э2,в}} = 895 - 1790 - 555.1 = -339.9 \text{ квар};$$

$$Q_{\text{э2,н}} = Q_{\min} + Q_{\text{к}}, \quad (3.10)$$

$$Q_{\text{э2,н}} = 895 + 0 = 895 \text{ квар};$$

где $Q_k = 0$.

Из-за повышенного уровня напряжения в период минимального потребления мощности принимаем наибольшее значение: $Q_{\rho 2} = 895$ квар.

Определяем суммарное значение мощности конденсаторных установок:

$$Q_{ку\max} = 1,15 \cdot Q_p - Q_{\rho 1}, \quad (3.11)$$

$$Q_{ку\max} = 1,15 \cdot 1790 - 555,1 = 1503,5 \text{ квар.}$$

Из них мощность нерегулируемых КУ составит:

$$Q_{ку\min} = Q_{\min} - Q_{\rho 2}, \quad (3.12)$$

$$Q_{ку\min} = 895 - 895 = 0.$$

То есть все КУ должны регулироваться.

Найдем величину реактивной мощности, которую требуется передать в электрическую сеть напряжением 0,4 кВ через силовые трансформаторы:

$$Q_{эн} = Q_{\rho 1} - (Q_p - Q_{p\Sigma}), \quad (3.13)$$

$$Q_{эн} = 555,1 - 1790 - 1680 = 445 \text{ квар.}$$

Найдем величину реактивной мощности, которую целесообразно передать в электрическую сеть напряжением 0,4 кВ через силовые трансформаторы:

$$Q_T = \sqrt{(N_T K_3 S_H)^2 - P_{p\Sigma}^2}, \quad (3.14)$$

$$Q_T = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 1600)^2 - 1962^2} = 1080,7 \text{ квар,}$$

$$Q_{КУН} = Q_{P\Sigma} - Q_T, \quad (3.15)$$

$$Q_{KVH} = 1680 - 1080.7 = 599.2 \text{ квар} ,$$

$$Q_{.KVB} = Q_{KV \max} - Q_{KVH} , \quad (3.16)$$

$$Q_{.KVB} = 1503.5 - 599.2 = 904.2 \text{ квар} .$$

Принимаем к установке цеховую КТП с двумя силовыми трансформаторами ТМГ-1600/10 и двумя конденсаторными установками типа АУКРМ 300 квар.

Определим продолжительность периода максимальных потерь

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_M}{10000} \right)^2 \cdot T_P , \quad (3.17)$$

$$\tau = \left(0.124 + \frac{4552}{10000} \right)^2 \cdot 8760 = 2938.7 \text{ ч.}$$

Определим удельную стоимость потерь на холостом ходу в силовом трансформаторе:

$$C_{XX} = \left(\frac{\alpha \cdot 12}{T_M} + \beta \right) \cdot T_P , \quad (3.18)$$

$$C_{XX} = \left(\frac{497 \cdot 12}{4552} + 1.173 \right) \cdot 8760 = 21.753 \text{ тыс.руб/кВт} .$$

Определим удельную стоимость потерь короткого замыкания в силовом трансформаторе:

$$C_{KЗ} = \left(\frac{\alpha \cdot 12}{T_M} + \beta \right) \cdot \tau , \quad (3.19)$$

$$C_{KЗ} = \left(\frac{497 \cdot 12}{4552} + 1.173 \right) \cdot 2938.7 = 7.297 \text{ тыс.руб/кВт} .$$

Величину $C \cdot \Delta P_T$, тыс. руб., определим по формуле:

$$C \cdot \Delta P_T = C_{XX} \cdot \Delta P_{XX} + C_{K3} \cdot K_3^2 \cdot \Delta P_{K3} , \quad (3.20)$$

$$C \cdot \Delta P_T = 21.753 \cdot 2.1 + 7.297 \cdot 0.7^2 \cdot 16.5 = 104.681 \text{ тыс.руб.}$$

Приведенные затраты на установку КТП с силовыми трансформаторами и компенсирующими устройствами $Z_{КТП}$, тыс. руб., определим по формуле:

$$Z_{КТП} = E \cdot (K_T \cdot N_T + K_{KV} \cdot N_{KV}) + C \cdot \Delta P \cdot N_T , \quad (3.21)$$

$$Z_{КТП} = 0.223 \cdot (736 \cdot 2 + 108.8 \cdot 2) + (104.681 \cdot 2) = 586.142 \text{ тыс.руб.}$$

3.1.2 Вариант с силовым трансформатором ТМГ-2500

По данным производителя силового трансформатора определяем его паспортные данные: $\Delta P_{XX} = 2.8 \text{ кВт}$, $\Delta P_{K3} = 27 \text{ кВт}$, $i_{XX} = 0.5 \%$, $u_{K3} = 6 \%$, $K_T = 1119 \text{ тыс. руб.}$

Произведем расчет потерь в трансформаторе:

$$\Delta P_{mp} = N_T \cdot (P_{XX} + K_3^2 \cdot P_{K3}) , \quad (3.22)$$

$$\Delta P_{mp} = 2 \cdot 2.8 + 0.7^2 \cdot 27 = 32.06 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_{mp} = N_T \cdot (i_0 + K_3^2 \cdot U_{K3}) \cdot \frac{S_n}{100} , \quad (3.23)$$

$$\Delta Q_{mp} = 2 \cdot 0.5 + 0.7^2 \cdot 6 \cdot \frac{2500}{100} = 172 \text{ квар.}$$

Найдем расчётную нагрузку цеха с учётом потерь активной и реактивной мощности в силовом трансформаторе:

$$P_p = P_{p\Sigma} + \Delta P_T , \quad (3.24)$$

$$P_p = 1962 + 32.06 = 1994.1 \text{ кВт},$$

$$Q_p = Q_{p\Sigma} + \Delta Q_T, \quad (3.25)$$

$$Q_p = 1680 + 172 = 1852 \text{ квар.}$$

Рассчитаем реактивную мощность в период минимальных нагрузок:

$$Q_{\min} = 50\% \cdot Q_p, \quad (3.26)$$

$$Q_{\min} = 0.5 \cdot 1852 = 926 \text{ квар.}$$

Определим экономически выгодное значение реактивной мощности в период максимальных нагрузок в энергосистеме:

$$Q'_{\text{э1}} = Q_p - 0,7 Q_{\text{сд}}, \quad (3.27)$$

$$Q'_{\text{э1}} = 1852 - 0.7 \cdot 0 = 1852 \text{ квар,}$$

$$Q''_{\text{э1}} = \alpha \cdot P_p, \quad (3.28)$$

$$Q''_{\text{э1}} = 0.28 \cdot 1994.1 = 558.3 \text{ квар.}$$

где $\alpha = 0,28$; $Q_{\text{сд}} = 0$.

Принимаем наименьшее значение $Q_{\text{э1}} = 558.3 \text{ квар.}$

Определим экономически целесообразные значения реактивной мощности в часы минимальных нагрузок:

$$Q_{\text{э2,в}} = Q_{\min} - Q_{\text{кд}} = Q_{\min} - (Q_p - Q_{\text{э1}}), \quad (3.29)$$

$$Q_{\text{э2,в}} = 926 - 1852 - 558.3 = -367.6 \text{ квар;}$$

$$Q_{\text{э2,н}} = Q_{\min} + Q_{\text{к}}, \quad (3.30)$$

$$Q_{\text{э2,н}} = 926 + 0 = 926 \text{ квар;}$$

где $Q_{\text{к}} = 0$.

Из-за повышенного уровня напряжения в период минимального потребления мощности принимаем наибольшее значение: $Q_{\text{э2}} = 926 \text{ квар.}$

Определяем суммарное значение мощности конденсаторных установок:

$$Q_{ку\max} = 1,15 \cdot Q_p - Q_{\varepsilon 1}, \quad (3.31)$$

$$Q_{ку\max} = 1,15 \cdot 1852 - 558,3 = 1571,4 \text{ квар.}$$

Из них мощность нерегулируемых КУ составит:

$$Q_{ку\min} = Q_{\min} - Q_{\varepsilon 2}, \quad (3.32)$$

$$Q_{ку\min} = 926 - 926 = 0.$$

То есть все КУ должны регулироваться.

Найдем величину реактивной мощности, которую требуется передать в электрическую сеть напряжением 0,4 кВ через силовые трансформаторы:

$$Q_{\varepsilon H} = Q_{\varepsilon 1} - (Q_p - Q_{p\Sigma}), \quad (3.33)$$

$$Q_{\varepsilon H} = 558,3 - 1852 - 1680 = 386,3 \text{ квар.}$$

Найдем величину реактивной мощности, которую целесообразно передать в электрическую сеть напряжением 0,4 кВ через силовые трансформаторы:

$$Q_T = \sqrt{(N_T K_3 S_H)^2 - P_{p\Sigma}^2}, \quad (3.34)$$

$$Q_T = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 2500)^2 - 1962^2} = 2898,3 \text{ квар,}$$

$$Q_{КУН} = Q_{P\Sigma} - Q_T, \quad (3.35)$$

$$Q_{КУН} = 1680 - 2898,3 = -1218,4 < 50 \text{ квар,}$$

$$Q_{КУВ} = Q_{КУ\max} - Q_{КУН}, \quad (3.36)$$

$$Q_{КУВ} = 1571,4 - 0 = 1571 \text{ квар.}$$

Так как $Q_{KVH} < 50$ квар, то размещение низковольтных КУ нецелесообразно.

Принимаем к установке цеховую КТП с двумя силовыми трансформаторами ТМГ-2500/10 без конденсаторных установок.

Величину $C \cdot \Delta P_T$, тыс. руб., определим по формуле:

$$C \cdot \Delta P_T = C_{XX} \cdot \Delta P_{XX} + C_{K3} \cdot K_3^2 \cdot \Delta P_{K3}, \quad (3.37)$$

$$C \cdot \Delta P_T = 21.753 \cdot 2.8 + 7.297 \cdot 0.7^2 \cdot 27 = 157.453 \text{ тыс.руб.}$$

Приведенные затраты на установку КТП с силовыми трансформаторами и компенсирующими устройствами $Z_{КТП}$, тыс. руб., определим по формуле:

$$Z_{КТП} = E \cdot (K_T \cdot N_T + K_{KV} \cdot N_{KV}) + C \cdot \Delta P \cdot N_T, \quad (3.38)$$

$$Z_{КТП} = 0.223 \cdot (1119 \cdot 2) + (157.453 \cdot 2) = 813.98 \text{ тыс.руб.}$$

По минимуму приведенных затрат на основное оборудование КТП принимаем к установке 2х трансформаторную подстанцию с силовыми трансформаторами ТМГ-1600/10.

Для остальных цехов предприятия выбор трансформаторов КТП производим аналогичным образом.

4 Определение необходимого числа и номинальной мощности силовых трансформаторов главной понизительной подстанции

Результаты выбора числа силовых трансформаторов на ГПП зависят от требуемой надежности электроснабжения потребителей, получающих питание от подстанции и от величины расчетной нагрузки потребителей.

Для обеспечения питания потребителей электрической энергии, которые относятся к первой категории по надежности электроснабжения используются двух- или трехтрансформаторные подстанции с устройством АВР на стороне НН трансформаторной подстанции.

Для обеспечения питания потребителей электроэнергии, относящихся к второй категории по надежности электроснабжения следует принимать двух- или трехтрансформаторные подстанции, однотрансформаторные подстанции можно использовать если время, необходимое для замены вышедшего из строя силового трансформатора не будет превышать 1 дня, при этом требуемая степень надежности электроснабжения будет обеспечена за счет линий со стороны низкого напряжения от других ГПП [15, 16].

Величину рационального напряжения питания предприятия можно определить по формуле:

$$U_{РАЦ} = 4.34 \cdot \sqrt{L + 0.016 \cdot P_{PI}}, \quad (4.1)$$
$$U_{РАЦ} = 4.34 \cdot \sqrt{9 + 0.016 \cdot 25827} = 89 \text{ кВ},$$

где расчетная активная нагрузка предприятия определяется:

$$P_{PI} = P_{PH} + P_{PB} + P_{STOP}, \quad (4.2)$$
$$P_{PI} = 20215.53 + 5611.28 + 0 = 25827 \text{ кВт}.$$

Полную расчетную нагрузку предприятия определим по формуле:

$$S_{PI} = \sqrt{P_{PI}^2 + Q_{ЭC}^2}, \quad (4.3)$$

$$S_{PI} = \sqrt{25827^2 + 6457^2} = 26622 \text{ кВА},$$

где величину расчетной реактивной нагрузки предприятия найдем по формуле:

$$Q_{ЭC} = P_{PI} \cdot \operatorname{tg}\phi, \quad (4.4)$$

$$Q_{ЭC} = 25827 \cdot 0.25 = 6457 \text{ квар.}$$

Для питания потребителей электроэнергии, относящихся к первой и второй категориям, на ГПП предприятия устанавливаем 2 силовых трансформатора. Значение номинальной мощности силовых трансформаторов находим с учетом допустимой 40% перегрузки в послеаварийном режиме.

$$S_{номт} \approx K_{1-2} \cdot S_{PI} \frac{1}{K_{пер}}, \quad (4.5)$$

$$S_{номт} \approx 0,8 \cdot 26622 \cdot \frac{1}{1,4} = 15213 \text{ кВА.}$$

По шкале номинальных мощностей силовых трансформаторов и каталогу производителя выбираем для дальнейшего рассмотрения два варианта: трансформаторы ТДН-16000/110/10 и следующий по шкале номинальных мощностей ТРДН-25000/110/10/10.

4.1 Вариант установки на ГПП предприятия двух силовых трансформаторов ТДН - 16000/110/10

По сайту производителя силового трансформатора определяем его паспортные данные: $\Delta P_{XX} = 18.5 \text{ кВт}$, $\Delta P_{K3} = 86 \text{ кВт}$, $i_{XX} = 0.72 \%$, $u_{K3} = 10.5 \%$, $K_T = 24544 \text{ тыс. руб.}$

Найдем значение приведенных потерь активной мощности в силовом трансформаторе на холостом ходу по формуле:

$$\Delta P_x' = \Delta P_x + K_{un} \cdot \Delta Q_x, \quad (4.6)$$

$$\Delta P_x' = 18.5 + 0.05 \cdot 115.2 = 24.26 \text{ кВт},$$

где

$$\Delta Q_x = I_{xx\%} + S_{ном.т} / 100, \quad (4.7)$$

$$\Delta Q_x = 0.72 + 16000 / 100 = 115.2 \text{ квар},$$

$$K_{un} = 0,05 \text{ кВт} / \text{квар}.$$

Найдем значение приведенных потерь активной мощности в силовом трансформаторе в режиме короткого замыкания по формуле:

$$\Delta Q_k = u_{k\%} \cdot S_{ном.т} / 100, \quad (4.8)$$

$$\Delta Q_k = 10.5 \cdot 16000 / 100 = 1680 \text{ квар},$$

$$\Delta P_k' = \Delta P_k + K_{un} \cdot \Delta Q_k, \quad (4.9)$$

$$\Delta P_k' = 86 + 0.05 \cdot 1680 = 170 \text{ кВт}.$$

Значение коэффициента загрузки трансформатора найдем по формуле:

$$K_z = \frac{S_{нагр}}{S_{ном,Т}}, \quad (4.10)$$

$$K_z = \frac{26622}{16000} = 1.664 .$$

Найдем значение приведенных потерь активной мощности в силовом трансформаторе по формуле:

$$P_m^{\dot{}} = \Delta P_x^{\dot{}} + K_3^2 \cdot \Delta P_k^{\dot{}} , \quad (4.11)$$

$$P_m^{\dot{}} = 24.26 + 1.664^2 \cdot 170 = 494.9 \text{ кВт.}$$

По суммарному годовому графику нагрузки подстанции (рисунок 4.1) найдем значение годовых потерь электрической энергии в силовых трансформаторах:

$$\Delta W = \sum n_i \cdot \Delta P_x' \cdot T_i + \sum \frac{1}{n_i} \cdot K_{36}^2 \cdot \Delta P_k' \cdot T_i = \Delta W_x + \Delta W_k \quad (4.12)$$

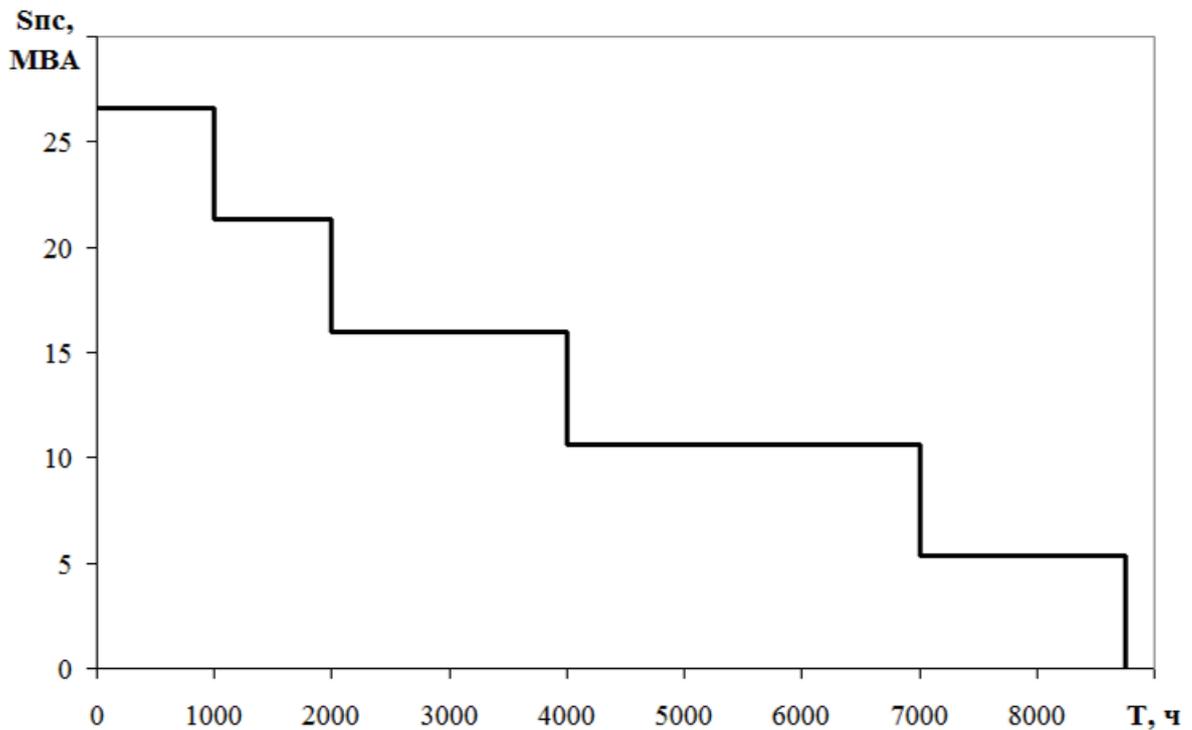


Рисунок 4.1 – Суммарный годовой график нагрузки подстанции предприятия

Результаты определения потерь электроэнергии в трансформаторах подстанции на каждой ступени годового графика нагрузки сводим в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 - Результаты определения потерь электроэнергии в трансформаторах подстанции на каждой ступени годового графика нагрузки

i	S_{Bi} , MBA	T_i , ч	$K_{зBi}$	$\Delta W_{\kappa Bi}$, кВт·ч	ΔW_{xi} , кВт·ч
1	26.622	1000	1.664	235321	48520
2	21.298	1000	1.331	150605	48520
3	15.973	2000	0.998	169431	97040
4	10.649	3000	0.666	112954	145560
5	5.324	1760	0.333	16567	85395
		$\Sigma \Delta W_{\kappa Bi} = 684878$		$\Sigma \Delta W_{xi} = 425035$	

По величине суммарных годовых потерь электроэнергии в трансформаторах подстанции определяем стоимость потерь за год:

$$I_{\Delta W_{ПТС}} = \Delta W_{nc} \cdot C_{\text{э}}, \quad (4.13)$$

$$I_{\Delta W_{ПТС}} = (684878 + 425035) \cdot 2.483 = 2756 \text{ тыс. руб.}$$

где $C_{\text{э}} = 2.483 \text{ руб} / \text{кВт} \cdot \text{ч}$ - стоимость 1 кВт·ч потерь электрической энергии.

Определим значение суммарных приведенных затрат на ГПП по формуле:

$$Z_{\text{прив}} = E_n \cdot K + I = E_n \cdot K + I_{\text{э}} + I_{\Delta W_{ПТС}}, \quad (4.14)$$

$$Z_{\text{прив}} = 0.25 \cdot 49088 + 4614 + 2756 = 19642 \text{ тыс. руб.}$$

где $K = 2 \cdot 24544 = 49088 \text{ тыс. руб.}$ – цена за два силовых трансформатора ТДН-16000/110;

$$I_{\text{э}} = P_{\text{сум}} \cdot K = 0,094 \cdot 49088 = 4614 \text{ тыс. руб.}$$
 – годовые отчисления.

4.2 Вариант установки на ГПП предприятия двух силовых трансформаторов ТРДН -25000/110/10

По сайту производителя силового трансформатора определяем его паспортные данные: $\Delta P_{XX} = 26 \text{ кВт}$, $\Delta P_{K3} = 121 \text{ кВт}$, $i_{XX} = 0.67 \%$, $u_{K3} = 10.5 \%$, $K_T = 29999 \text{ тыс. руб.}$

Найдем значение приведенных потерь активной мощности в силовом трансформаторе на холостом ходу по формуле:

$$\Delta P_x' = \Delta P_x + K_{un} \cdot \Delta Q_x, \quad (4.15)$$
$$\Delta P_x' = 26 + 0.05 \cdot 167.5 = 34.38 \text{ кВт},$$

где

$$\Delta Q_x = I_{xx\%} + S_{ном.т} / 100, \quad (4.16)$$
$$\Delta Q_x = 0.67 + 25000 / 100 = 167.5 \text{ квар},$$
$$K_{un} = 0,05 \text{ кВт / квар}.$$

Найдем значение приведенных потерь активной мощности в силовом трансформаторе в режиме короткого замыкания:

- для обмотки напряжением 110 кВ по формулам:

$$\Delta Q_{к.в} = U_{к.в\%} \cdot S_{ном.т} / 100, \quad (4.17)$$
$$\Delta Q_{к.в} = 1.3 \cdot 25000 / 100 = 328.1 \text{ квар},$$

$$U_{к.в\%} = 0,125 \cdot u_{к.ВН-НН}, \quad (4.18)$$

$$U_{к.в\%} = 0,125 \cdot 10.5 = 1.3 \%,$$

$$\Delta P'_{к.в} = \Delta P_{к.в} + K_{un} \cdot \Delta Q_{к.в}, \quad (4.19)$$

$$\Delta P'_{к.б} = 0 + 0.05 \cdot 328.1 = 16.4 \text{ кВт.}$$

$$\Delta P_{к.б} = 0.$$

- для обмотки напряжением 10 кВ по формулам:

$$\Delta Q_{к.н1} = \Delta Q_{к.н2} = U_{к.н1,2\%} \cdot S_{ном,т} / 100, \quad (4.20)$$

$$\Delta Q_{к.н1} = \Delta Q_{к.н2} = 18.375 \cdot 25000 / 100 = 4593.8 \text{ квар,}$$

$$U_{к.н1\%} = U_{к.н2\%} = 1,75 \cdot u_{к.ВН-НН}, \quad (4.21)$$

$$U_{к.н1\%} = U_{к.н2\%} = 1,75 \cdot 10.5 = 18.375 \%,$$

$$\Delta P'_{к.н1} = \Delta P'_{к.н2} = \Delta P_{к.н1,2} + K_{ин} \cdot \Delta Q_{к.н1,2}, \quad (4.22)$$

$$\Delta P'_{к.н1} = \Delta P'_{к.н2} = 242 + 0.05 \cdot 4593.8 = 471.7 \text{ кВт,}$$

$$\Delta P_{к.н1,2} = 2 \cdot \Delta P_{к.ВН-НН}, \quad (4.23)$$

$$\Delta P_{к.н1,2} = 2 \cdot 245 = 490 \text{ кВт.}$$

Значение коэффициентов загрузки каждой из обмоток трансформатора найдем по формуле:

$$K_{з.б} = \frac{S_B}{S_{ном,Т}}, \quad (4.24)$$

$$K_{з.б} = \frac{26622}{25000} = 1.06.$$

$$K_{з.н1} = K_{з.н2} = \frac{S_{н1,2}}{S_{ном,Т}}, \quad (4.25)$$

$$K_{з.н1} = K_{з.н2} = \frac{13311}{25000} = 0.53.$$

Найдем значение приведенных потерь активной мощности в силовом трансформаторе по формуле:

$$P_m^{\dot{}} = \Delta P_x^{\dot{}} + K_{3.6}^2 \cdot \Delta P_{к.6}^{\dot{}} + K_{3.н1}^2 \cdot \Delta P_{к.н1}^{\dot{}} + K_{3.н2}^2 \cdot \Delta P_{к.н2}^{\dot{}} , \quad (4.26)$$

$$P_m^{\dot{}} = 34.38 + 1.06^2 \cdot 16.4 + 0.53^2 \cdot 471.7 + 0.53^2 \cdot 471.7 = 320.4 \text{ кВт} .$$

По суммарному годовому графику нагрузки подстанции найдем значение годовых потерь электрической энергии в силовых трансформаторах:

$$\Delta W_{nc} = \sum \Delta W_{xi} + \sum \Delta W_{ki} = \sum n_i \cdot \Delta P_x' \cdot T_i + \sum \left(\frac{1}{n_i} \cdot K_{3.6i}^2 \cdot \Delta P_{к.6}' \cdot T_i + \frac{1}{n_i} \cdot K_{3.н1i}^2 \cdot \Delta P_{к.н1}' \cdot T_i + \frac{1}{n_i} \cdot K_{3.н2i}^2 \cdot \Delta P_{к.н2}' \cdot T_i \right) \quad (4.27)$$

Результаты определения потерь электроэнергии в трансформаторах подстанции на каждой ступени годового графика нагрузки сводим в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 - Результаты определения потерь электроэнергии в трансформаторах подстанции на каждой ступени годового графика нагрузки

i	$S_{Bi},$ MBA	$S_{H1i},$ MBA	$S_{H2i},$ MBA	n_i	$T_i, ч$	$\Delta W_{xi},$ $\kappa Bm \cdot ч$	$K_{зBi}$	$K_{зH1i}$	$K_{зH2i}$	$\Delta W_{\kappa Bi},$ $\kappa Bm \cdot ч$	$\Delta W_{\kappa H1i},$ $\kappa Bm \cdot ч$	$\Delta W_{\kappa H2i},$ $\kappa Bm \cdot ч$
1	26.622	13.311	13.311	2	1000	68750	1.065	0.532	0.532	9302	66860	66860
2	21.298	10.649	10.649	2	1000	68750	0.852	0.426	0.426	5953	42790	42790
3	15.973	7.987	7.987	2	2000	137500	0.639	0.319	0.319	6698	48139	48139
4	10.649	5.324	5.324	2	3000	206250	0.426	0.213	0.213	4465	32093	32093
5	5.324	2.662	2.662	2	1760	121000	0.213	0.106	0.106	655	4707	4707
$\Sigma \Delta W_{xi} = 602250$										$\Sigma \Delta W_{\kappa Bi} = 416251$		

По величине суммарных годовых потерь электроэнергии в трансформаторах подстанции определяем стоимость потерь за год:

$$I_{\Delta W_{nc}} = \Delta W_{nc} \cdot C_3, \quad (4.28)$$

$$I_{\Delta W_{nc}} = (416251 + 602250) \cdot 2.483 = 2529 \text{ тыс. руб.}$$

где $C_3 = 2.483 \text{ руб} / \text{кВт} \cdot \text{ч}$ - стоимость 1 кВт·ч потерь электрической энергии.

Определим значение суммарных приведенных затрат на ГПП по формуле:

$$Z_{прив} = E_n \cdot K + I = E_n \cdot K + I_3 + I_{\Delta W_{nc}}, \quad (4.29)$$

$$Z_{прив} = 0.25 \cdot 59998.58 + 5640 + 2529 = 23168 \text{ тыс. руб.}$$

где $K = 2 \cdot 29999 = 59998 \text{ тыс. руб.}$ - цена за два силовых трансформатора ТРДН-25000/110;

$$I_3 = P_{сум} \cdot K = 0,094 \cdot 59998 = 5640 \text{ тыс. руб.} - \text{годовые отчисления.}$$

По минимальным приведенным затратам выбираем к установке на ГПП первый вариант с силовыми трансформаторами ТДН- 16000/110/10.

5 Выбор схемы ГПП

Схемы распределительных устройств с напряжением 6-10 кВ на ГПП следует применять с одиночной секционированной системой сборных шин при числе трансформаторов на подстанции равном 2.

В РУ 6-10 кВ в качестве основного коммутационного аппарата рекомендуются к использованию вакуумные выключатели, измерительные ТТ и ТН с литой изоляцией, сухие силовые трансформаторы для собственных нужд. Трансформаторы тока должны иметь две-три вторичные обмотки. Если не устанавливаются антиферрорезонансные трансформаторы напряжения (ТН), то должны приниматься меры по недопущению резонансных перенапряжений в цепях ТН.

В распределительном устройстве 110 кВ вновь возводимых подстанций запрещены схемы с отделителями и короткозамыкателями и с беспортальным приемом воздушных линий.

В РУ 110 кВ рекомендуется применять:

- колонковые и баковые элегазовые выключатели с пружинными приводами;
- разъединители с электродвигательными приводами основных и заземляющих ножей, что позволяет улучшить обслуживание и повысить автоматизированность подстанций;
- антирезонансные или емкостные ТН. В случае применения одноразрывных выключателей допускается применение электромагнитных трансформаторов напряжения.

Не рекомендуется применять разъединители с ручным приводом при классе напряжения 110 кВ. Не разрешается применять на вновь возводимы ГПП воздушные и маломасляные высоковольтные выключатели (ВВ), а также пневматические приводы к ВВ [17, 18].

6 Расчет токов короткого замыкания

При определении значений тока КЗ принято не учитывать следующие факторы:

- сдвиг по фазе электродвижущих сил синхронных машин, а также изменение частоты их вращения при продолжительности короткого замыкания менее 0,5 с.;
- токи намагничивания в силовых трансформаторах и автотрансформаторах;
- насыщение магнитной системы в электрических машинах;
- поперечную емкость воздушных ЛЭП номинальным напряжением 110–220 кВ при длине до 200 км, и номинальным напряжением 330–500 кВ при длине до 150 км;
- воздействие активных сопротивлений элементов на амплитуду периодической составляющей тока короткого замыкания, в том случае если активное результирующее сопротивление составляет не более 30% от индуктивного [19].

Для определения значений токов короткого замыкания составляем две схемы: расчетную и схему замещения, которые представлены на рисунке 6.1.

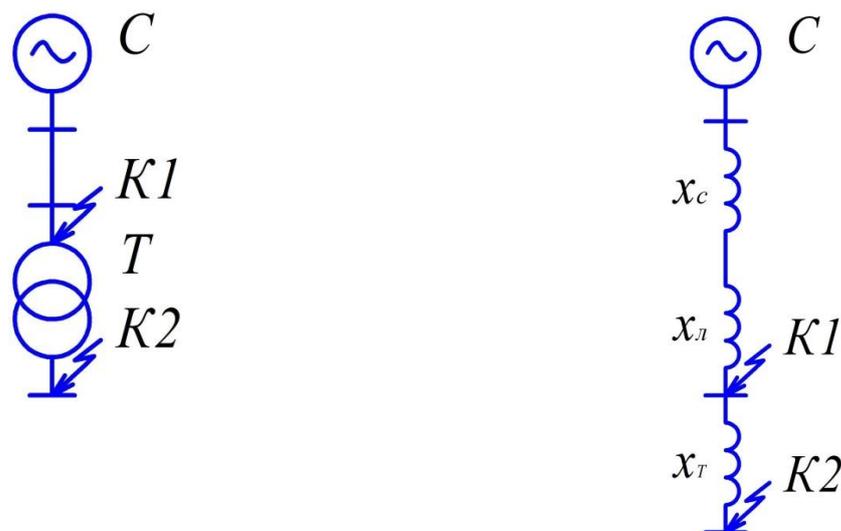


Рисунок 6.1 - Расчётная и схема замещения для определения значений токов короткого замыкания

Параметры, необходимые для определения значений токов КЗ:

Параметры внешней ЭЭС: $U_{cp} = 115$ кВ; $S_{\bar{o}} = 1000$ МВА; $S_{\kappa} = 2650$ МВА.

Параметры питающей воздушной линии электропередачи:
 $x_{y\bar{o}} = 0,4$ Ом/км; $L = 9$ км.

Параметры выбранного к установке на ГПП силового трансформатора:
 $S_{H} = 16$ МВА; $U_{\kappa} = 10.5$ %.

Определим сопротивление системы по формуле:

$$x_{c.\bar{o}} = \frac{S_{\bar{o}}}{S_{\kappa}}; \quad (6.1)$$

$$x_{c.\bar{o}} = \frac{1000}{2650} = 0.377.$$

Определим сопротивление воздушной линии электропередачи по формуле:

$$x_{BЛ.\bar{o}} = \frac{x_{y\bar{o}}}{2} \cdot L \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{сн}^2}; \quad (6.2)$$

$$x_{BЛ.\bar{o}} = \frac{0.4}{2} \cdot 9 \cdot \frac{1000}{115^2} = 0.136.$$

Определим сопротивление принятого к установке на ГПП силового трансформатора ТДН-16000/110/10 по формуле:

$$x_{T.\bar{o}} = \frac{U_{\kappa}, \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_{H}}; \quad (6.3)$$

$$x_{T.\bar{o}} = \frac{10.5}{100} \cdot \frac{1000}{16} = 6.563.$$

6.1 Расчет для точки К1

Определим суммарное сопротивление цепи:

$$x_{рез1} = x_{с.б} + x_{БЛ.б}; \quad (6.4)$$
$$x_{рез1} = 0.377 + 0.136 = 0.513.$$

Найдем значение базисного тока:

$$I_{б.к1} = \frac{S_{б}}{\sqrt{3} \cdot U_{сн}}; \quad (6.5)$$
$$I_{б.к1} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 5.02 \text{ кА};$$

Определим начальное действующее значение трехфазного тока короткого замыкания по формуле:

$$I_{к1}^{(3)} = \frac{E_{б}}{x_{рез1}} \cdot I_{б}; \quad (6.6)$$
$$I_{к1}^{(3)} = \frac{1}{0.513} \cdot 5.02 = 9.778 \text{ кА};$$

Определим значение ударного тока КЗ:

$$i_{уд.к1} = \sqrt{2} \cdot I_{н.о}^3 \cdot K_{уд}; \quad (6.7)$$
$$i_{уд.к1} = \sqrt{2} \cdot 9.778 \cdot 1.8 = 24.89 \text{ кА}.$$

6.2 Расчет для точки К2

Определим суммарное сопротивление цепи:

$$x_{pez2} = x_{pez1} + x_{T,\delta}; \quad (6.8)$$

$$x_{pez2} = 0.513 + 6.563 = 7.076.$$

Найдем значение базисного тока:

$$I_{\delta,к2} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{сн}}; \quad (6.9)$$

$$I_{\delta,к2} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10.5} = 54.986 \text{ кА};$$

Определим начальное действующее значение трехфазного тока короткого замыкания по формуле:

$$I_{к2}^3 = \frac{E_{\delta}^{\wedge}}{x_{pez2}} \cdot I_{\delta,к2}; \quad (6.10)$$

$$I_{к2}^3 = \frac{1}{7.076} \cdot 54.986 = 7.771 \text{ кА};$$

Определим значение ударного тока КЗ:

$$i_{уд,к2} = \sqrt{2} \cdot I_{н,о}^3 \cdot K_{уд}; \quad (6.11)$$

$$i_{уд,к2} = \sqrt{2} \cdot 7.771 \cdot 1.85 = 20.331 \text{ кА}.$$

Результаты определения значений токов короткого замыкания заносим в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты определения значений токов короткого замыкания

№ точки КЗ	$U_{сн}$, кВ	$K_{уд}$	$I_{к}^{\ominus}$, кА	$i_{уд}$, кА
1	115	1.8	9.8	24.9
2	10.5	1.85	7.8	20.3

7 Выбор и проверка основного электрооборудования на главной понизительной подстанции

7.1 Выбор электрических аппаратов на стороне 110 кВ

7.1.1 Выбор высоковольтного выключателя

На стороне высокого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем высоковольтный выключатель (ВВ) типа ВГБ-110А.

ВВ выбираем и проверяем по следующим условиям [20]:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (7.1)$$
$$110 \text{ кВ} \leq 110 \text{ кВ};$$

- значению номинального тока:

$$I_{max} < I_n, \quad (7.2)$$
$$112 \text{ А} < 2000 \text{ А},$$

где

$$I_{max} = 1.4 \cdot \frac{S_{н.Т}}{\sqrt{3} \cdot U_{сн}}, \quad (7.3)$$
$$I_{max} = 1.4 \cdot \frac{16000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 112 \text{ А};$$

- коммутационной способности:

$$I_{к1} \leq I_{откл.н}, \quad (7.4)$$
$$9.8 \text{ кА} \leq 40 \text{ кА},$$

$$i_{a,\tau} \leq i_{a.n.}, \quad (7.5)$$

$$8.4 \text{ кА} \leq 22.6 \text{ кА},$$

где

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{к1} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}}, \quad (7.6)$$

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot 9.8 \cdot e^{\frac{-0.05}{0.1}} = 8.4 \text{ кА},$$

$$i_{a.n.} = \sqrt{2} \cdot \beta_n / 100 \cdot I_{откл.н.}, \quad (7.7)$$

$$i_{a.n.} = \left(\sqrt{2} \cdot \frac{40}{100} \right) \cdot 40 = 22.6 \text{ кА},$$

- электродинамической стойкости:

$$I_{к1} \leq I_{пр.с.}, \quad (7.8)$$

$$9.8 \text{ кА} \leq 40 \text{ кА};$$

$$i_{уд} \leq i_{пр.с.}, \quad (7.9)$$

$$24.9 \text{ кА} \leq 100 \text{ кА};$$

- термической стойкости:

$$B_k \leq I_{терм}^2 \cdot t_{откл.}, \quad (7.10)$$

$$19.2 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 62.5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

Принятый к установке на стороне высокого напряжения на ГПП высоковольтный выключатель типа ВГБ-110А прошел необходимые проверки.

7.1.2 Выбор разъединителя

На стороне высокого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем разъединитель типа РДЗ-2-110/1000 УХЛ1.

Разъединитель выбираем и проверяем по следующим условиям:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (7.11)$$
$$110 \text{ кВ} \leq 110 \text{ кВ};$$

- значению номинального тока:

$$I_{max} < I_n, \quad (7.12)$$
$$112 \text{ А} < 1000 \text{ А},$$

- электродинамической стойкости:

$$i_{уд} \leq i_{нр.с}, \quad (7.13)$$
$$24.9 \text{ кА} \leq 80 \text{ кА};$$

- термической стойкости:

$$B_k \leq I_{нр.с}^2 \cdot t_{нр.с}, \quad (7.14)$$
$$19.2 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 40 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Принятый к установке на стороне высокого напряжения на ГПП разъединитель типа РДЗ-2-110/1000 УХЛ1 прошел необходимые проверки.

7.1.3 Выбор трансформатора тока

На стороне высокого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем трансформатор тока типа ТФЗМ-110У1-200-0,5.

Трансформатор тока выбирается и проверяется по:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (7.15)$$
$$110 \text{ кВ} \leq 110 \text{ кВ};$$

- значению номинального тока:

$$I_{\max} \leq I_{Н.ТТ}, \quad (7.16)$$
$$112 \text{ А} \leq 200 \text{ А};$$

- электродинамической стойкости:

$$i_{уд} \leq i_{эдин.ст}, \quad (7.17)$$
$$24.9 \text{ кА} \leq 55 \text{ кА};$$

- термической стойкости:

$$B_k \leq K_T^2 \cdot I_{1ном.}^2 \cdot t_{откл} = I_T^2 \cdot t_{откл}, \quad (7.18)$$
$$19.2 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 62.5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

- величине вторичной нагрузки:

$$Z_2 \leq Z_{2ном}, \quad (7.19)$$

где $Z_2 \approx R_2$

$$R_2 = R_{\text{приб}} + R_{\text{пр}} + R_{\text{к}}, \quad (7.20)$$

К вторичной нагрузке трансформатора тока относится амперметр мощностью 0,1 ВА. Определим активное сопротивление прибора:

$$R_{\text{приб}} = \frac{S_{\text{приб}}}{I_2^2}, \quad (7.21)$$

$$R_{\text{приб}} = \frac{0.1}{5^2} = 0.004 \text{ Ом}.$$

Значение максимально допустимого сопротивления проводов составит:

$$R_{\text{пр}} = Z_{2\text{ном}} - R_{\text{приб}} - R_{\text{к}},$$

$$R_{\text{пр}} = 1.2 - 0.004 - 0.1 = 1.096 \text{ Ом}.$$

Определим минимально допустимое сечение медного провода:

$$s = \frac{\rho \cdot l_{\text{п}}}{R_{\text{пр}}}, \quad (7.22)$$

$$s = \frac{0.0175 \cdot 60}{1.096} = 0.958 \text{ мм}^2.$$

Исходя из условия механической прочности, принимаем сечение медных жил 2.5 мм².

Принятый к установке на стороне высокого напряжения на ГПП трансформатор тока типа ТФЗМ-110У1-200-0,5 прошел необходимые проверки.

7.1.4 Выбор гибких шин

В качестве гибких шин при номинальном напряжении 110 кВ используются сталеалюминевые провода типа АС.

Определим необходимое сечение провода:

$$s = \frac{I_{\text{раб.ном}}}{j_{\text{э}}}; \quad (7.23)$$

$$s = \frac{80}{1.1} = 73 \text{ мм}^2.$$

Принимаем провода АС-95/16 мм² с максимальным значением продолжительного тока 330 А.

Определим наибольшую критическую напряженность электрического поля:

$$E_0 = 30.3 \cdot m \cdot \left(1 + \frac{0.299}{\sqrt{r_0}} \right); \quad (7.24)$$

$$E_0 = 30.3 \cdot 0.82 \cdot \left(1 + \frac{0.299}{\sqrt{0.675}} \right) = 33.9 \text{ кВ/м.}$$

Определим значение напряженности вблизи проводника:

$$E = \frac{0.354 \cdot U_{\text{н}}}{r_0 \cdot \lg \frac{1.26 \cdot D}{r_0}}; \quad (7.25)$$

$$E = \frac{0.354 \cdot 115}{0.675 \cdot \lg \frac{1.26 \cdot 300}{0.675}} = 21.9 \text{ кВ/м.}$$

Проверим на отсутствие короны:

$$1.07E \leq 0.9E_o; \quad (7.26)$$

$$23.5 \text{ кВ/м} < 30.5 \text{ кВ/м.}$$

Принятый к установке на стороне высокого напряжения на ГПП в качестве гибких шин провод типа АС-95/16 прошел необходимые проверки.

7.2 Выбор электрических аппаратов на стороне 10 кВ

7.2.1 Выбор высоковольтного выключателя

На стороне низкого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем ВВ типа VF-12.12.16.

ВВ выбираем и проверяем по следующим условиям:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (7.27)$$

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- значению номинального тока:

$$I_{max} < I_n, \quad (7.28)$$

$$1232 \text{ А} < 1250 \text{ А},$$

где

$$I_{max} = 1.4 \cdot \frac{S_{н.Т}}{\sqrt{3} \cdot U_{сн}}, \quad (7.29)$$

$$I_{max} = 1.4 \cdot \frac{16000}{\sqrt{3} \cdot 10.5} = 1232 \text{ А};$$

- коммутационной способности:

$$I_{к1} \leq I_{откл.н}, \quad (7.30)$$

$$7.8 \text{ кА} \leq 18 \text{ кА},$$

$$i_{a,\tau} \leq i_{a.н}, \quad (7.31)$$

$$3.2 \text{ кА} \leq 8.9 \text{ кА},$$

где

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{к1} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}}, \quad (7.32)$$

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot 7.8 \cdot e^{\frac{-0.11}{0.09}} = 3.2 \text{ кА},$$

$$i_{a.н} = \sqrt{2} \cdot \beta_n / 100 \cdot I_{откл.н}, \quad (7.33)$$

$$i_{a.н} = \left(\sqrt{2} \cdot \frac{35}{100} \right) \cdot 18 = 8.9 \text{ кА},$$

- электродинамической стойкости:

$$I_{к1} \leq I_{пр.с}, \quad (7.34)$$

$$7.8 \text{ кА} \leq 18 \text{ кА};$$

$$i_{yд} \leq i_{пр.с}, \quad (7.35)$$

$$20.3 \text{ кА} \leq 45 \text{ кА};$$

- термической стойкости:

$$B_k \leq I_{терм}^2 \cdot t_{откл}, \quad (7.36)$$

$$15.2 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 64 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Принятый к установке на стороне низкого напряжения на ГПП высоковольтный выключатель типа VF-12.12.16 прошел необходимые проверки.

7.2.2 Выбор трансформатора тока

На стороне низкого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем трансформатор тока типа ТЛК-10-1500/5 УЗ.

Трансформатор тока выбирается и проверяется по:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (7.37)$$
$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- значению номинального тока:

$$I_{\max} \leq I_{н.т.т}, \quad (7.38)$$
$$1232 \text{ А} \leq 1500 \text{ А};$$

- электродинамической стойкости:

$$i_{уд} \leq i_{э.дин.ст}, \quad (7.39)$$
$$20.3 \text{ кА} \leq 100 \text{ кА};$$

- термической стойкости:

$$B_k \leq K_T^2 \cdot I_{1ном}^2 \cdot t_{откл} = I_T^2 \cdot t_{откл}, \quad (7.40)$$
$$15.2 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 256 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

- величине вторичной нагрузки:

$$Z_2 \leq Z_{2ном} , \quad (7.41)$$

где $Z_2 \approx R_2$

$$R_2 = R_{приб} + R_{np} + R_{к} , \quad (7.42)$$

К вторичной нагрузке трансформатора тока на стороне низкого напряжения ГПП относятся счетчик активной и реактивной энергии, амперметр, ваттметр и варметр мощностью 6 ВА. Определим активное сопротивление приборов:

$$R_{приб} = \frac{S_{приб}}{I_2^2} , \quad (7.43)$$

$$R_{приб} = \frac{6}{5^2} = 0.24 \text{ Ом} .$$

Значение максимально допустимого сопротивления проводов составит:

$$R_{np} = Z_{2ном} - R_{приб} - R_{к} ,$$

$$R_{np} = 1.2 - 0.24 - 0.1 = 0.86 \text{ Ом} .$$

Определим минимально допустимое сечение медного провода:

$$s = \frac{\rho \cdot l_p}{R_{np}} , \quad (7.44)$$

$$s = \frac{0.0175 \cdot 45}{0.86} = 0.86 \text{ мм}^2 .$$

Исходя из условия механической прочности, принимаем сечение медных жил 2.5 мм^2 .

Принятый к установке на стороне низкого напряжения на ГПП трансформатор тока типа ТЛК-10-1500/5 УЗ прошел необходимые проверки.

По такому же принципу выбираем трансформаторы тока для отходящих линий.

7.2.3 Выбор трансформатора напряжения

На стороне высокого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем трансформатор напряжения типа ЗНОЛ.09-10.02 УЗ.

Трансформатор напряжения выбирается и проверяется по:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (7.45)$$

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- по классу точности;

- по величине вторичной нагрузки:

$$S_{2\Sigma} \leq S_{ном}, \quad (7.46)$$

$$S_{2\Sigma} = \sqrt{(\sum S_{приб} \cos \phi)^2 + (\sum S_{приб} \sin \phi)^2} = \sqrt{P_{приб}^2 + Q_{приб}^2}. \quad (7.47)$$

К вторичной нагрузке трансформатора напряжения относятся счетчики активной и реактивной электрической энергии с общей активной мощностью 80 Вт и 184 вар.

$$201 \text{ ВА} \leq 225 \text{ ВА}.$$

Принятый к установке на стороне низкого напряжения на ГПП трансформатор напряжения типа ЗНОЛ.09-10.02 У3 прошел необходимые проверки.

7.2.4 Выбор жестких шин

Выбор жестких шин осуществляем по экономической плотности тока:

$$s = \frac{I_{\text{раб.ном}}}{j_э}; \quad (7.48)$$

$$s = \frac{880}{1} = 880 \text{ мм}^2.$$

Выбираем алюминиевые шины прямоугольного сечения с размерами 80x10 мм, с максимальным продолжительным током 1480 А.

Определим минимальное сечение шины по условию термической стойкости:

$$s_{\text{min}} = \frac{\sqrt{B_K} \cdot 10^3}{C_T}, \quad (7.49)$$

$$s_{\text{min}} = \frac{\sqrt{15.2} \cdot 10^3}{66} = 59.1 \text{ мм}^2.$$

Определим значение силы, действующей на шины во время трехфазного короткого замыкания:

$$F_{\text{max}}^3 = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{a} \cdot l \cdot i_{\text{уд}}^2 \cdot K_\phi \cdot K_p, \quad (7.50)$$

$$F_{\text{max}}^3 = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{1} \cdot 2.5 \cdot 20300^2 \cdot 1 \cdot 1 = 178.4 \text{ Н}.$$

Определим значение момента сопротивления поперечного сечения шины по формуле:

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6}, \quad (7.51)$$

$$W = \frac{0.01 \cdot 0.08^2}{6} = 1.1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

Найдем значение максимального напряжения в материале проводника:

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}^3 \cdot l}{\lambda \cdot W}, \quad (7.52)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{178.4 \cdot 2.5}{8 \cdot 1.1 \cdot 10^{-5}} \cdot 10^{-6} = 5.2 \text{ МПа}.$$

Проверим на электродинамическую стойкость:

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{доп}}, \quad (7.53)$$

$$5.2 \text{ МПа} \leq 247.1 \text{ МПа},$$

где

$$\sigma_{\text{доп}} = 0.7 \cdot \sigma_p, \quad (7.54)$$

$$\sigma_{\text{доп}} = 0.7 \cdot 353 = 247.1 \text{ МПа}.$$

Найдем значение момента инерции поперечного сечения проводника по формуле:

$$J = \frac{b \cdot h^3}{12}, \quad (7.55)$$

$$J = \frac{0.01 \cdot 0.08^3}{12} = 4.3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4.$$

Найдем значение частоты собственных колебаний по формуле:

$$f_0 = \frac{r_1^2}{2 \cdot \pi \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m}}; \quad (7.56)$$

$$f_0 = \frac{3.14^2}{2 \cdot \pi \cdot 1^2} \cdot \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 4.3 \cdot 10^{-7}}{2.5}} = 27.5 \text{ Гц}.$$

При частоте собственных колебаний менее 30 Гц отсутствует механический резонанс.

7.2.5 Выбор опорных изоляторов

Опорные изоляторы используются для установки шин. Устанавливаем изоляторы типа ИОР-10-3,75 П УХЛ.

Опорные изоляторы выбираются и проверяются по:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (7.57)$$

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- значению максимальной нагрузки на головку изолятора:

$$F_{\max} \leq F_{доп}, \quad (7.58)$$

$$178.4 \text{ Н} < 1588 \text{ Н},$$

где

$$F_{доп} = 0.6 \cdot F_{разруш} \cdot \frac{H_u}{H}, \quad (7.59)$$

$$F_{\text{дон}} = 0.6 \cdot 3750 \cdot \frac{0.12}{0.17} = 1588 \text{ Н.}$$

где

$$H = H_u + b + \frac{h}{2}, \quad (7.60)$$

$$H = 0.12 + 0.01 + \frac{0.08}{2} = 0.17 .$$

Принятые к установке на стороне низкого напряжения на ГПП опорные изоляторы ИОР-10-3,75 II УХЛ прошли необходимые проверки.

7.2.6 Выбор проходных изоляторов

Выбираем проходные изоляторы типа ИП-10/1600-7,5 УХЛ2.

Проходные выбираются и проверяются по:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{\text{сети}} \leq U_n, \quad (7.61)$$

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- значению номинального тока:

$$I_{\text{max}} < I_n, \quad (7.62)$$

$$1232 \text{ А} < 1600 \text{ А};$$

- значению максимальной нагрузки на головку изолятора:

$$F_{\text{расч}} \leq 0.6 \cdot F_{\text{разр}}, \quad (7.63)$$

$$51.5 \text{ Н} < 4500 \text{ Н},$$

где

$$F_{расч} = 0.5 \cdot \frac{i_{yd}^2}{a} \cdot l_{из} \cdot 10^{-7}, \quad (7.64)$$

$$F_{расч} = 0.5 \cdot \frac{20300^2}{1} \cdot 2.5 \cdot 10^{-7} = 51.5.$$

Принятые к установке на ГПП проходные изоляторы типа ИП-10/1600-7,5 УХЛ2 прошли необходимые проверки.

8 Расчет заземления подстанции

Для времени отключения тока короткого замыкания 0.11 с максимально допустимое напряжение прикосновения равно 500 В [21].

Определим значение напряжения на заземлителе по формуле:

$$U_3 = \frac{U_{np.дон}}{\kappa_{II}}, \quad (8.1)$$

$$U_3 = \frac{500}{0.273} = 1828 \text{ В},$$

где коэффициент напряжения прикосновения определяется как:

$$\kappa_{II} = \frac{M\beta}{\left(\frac{l_0 L_2}{a\sqrt{S}}\right)^{0.45}}, \quad (8.2)$$

$$\kappa_{II} = \frac{0.5 \cdot 0.96}{\left(\frac{5 \cdot 310}{10 \cdot \sqrt{2000}}\right)^{0.45}} = 0.273,$$

а коэффициент, значение которого зависит от сопротивления человеческого тела, равен:

$$\beta = \frac{R_q}{R_q + 1.5\rho_{г.с}}, \quad (8.3)$$

$$\beta = \frac{1000}{1000 + 1.5 \cdot 30} = 0.96.$$

Вычисленное напряжения на заземлителе лежит в допустимых пределах (10 кВ).

Сопrotивление заземляющего устройства должно удовлетворять условию:

$$R_3 < R_{3,доп}. \quad (8.4)$$

Определим число ячеек для расчетной модели заземлителя по формуле:

$$m = \frac{L_2}{2 \cdot \sqrt{S}} - 1, \quad (8.5)$$
$$m = \frac{310}{2 \cdot \sqrt{2000}} - 1 \approx 2.$$

Определим значение длины полос в расчетной модели по формуле:

$$L_2' = 2\sqrt{S}(m+1), \quad (8.6)$$
$$L_2' = 2\sqrt{2000} \cdot (2+1) = 268.3 \text{ м.}$$

Определим длину сторон ячейки по формуле:

$$b = \frac{\sqrt{S}}{m}, \quad (8.7)$$
$$b = \frac{\sqrt{2000}}{2} = 22.4 \text{ м.}$$

Определим число вертикальных заземлителей, которые необходимо установить по контуру:

$$n_г = \frac{\sqrt{S} \cdot 4}{1 \cdot l_г}, \quad (8.8)$$

$$n_g = \frac{\sqrt{2000} \cdot 4}{1.5} \approx 36.$$

Определим общую протяженность вертикальных заземлителей:

$$L_g = l_g \cdot n_g, \quad (8.9)$$

$$L_g = 5 \cdot 36 = 180 \text{ м.}$$

Определим значение относительной глубины погружения вертикальных заземлителей по формуле:

$$\frac{l_B + t}{\sqrt{S}}, \quad (8.10)$$

$$\frac{5 + 0.7}{\sqrt{2000}} = 0.127.$$

Определим значение суммарного сопротивления для сложного заземлителя:

$$R_3 = A \frac{\rho_3}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_3}{L_2 + L_g}, \quad (8.11)$$

$$R_3 = 0.337 \cdot \frac{30}{\sqrt{2000}} + \frac{30}{310 + 180} = 0.29 \text{ Ом,}$$

где

$$A = \left(0.444 - 0.84 \frac{l_g + t}{\sqrt{S}} \right), \quad (8.12)$$

$$A = 0.444 - 0.84 \cdot 0.127 = 0.337;$$

Найденное значение суммарного сопротивления для сложного заземлителя менее максимально допустимого сопротивления 0,5 Ом.

Заключение

В бакалаврской работе была спроектирована система электроснабжения моторного завода, позволяющая выполнить заданные требования по надежности электроснабжения потребителей при минимальных потерях электроэнергии. При проектировании была определена расчетная мощность по предприятию в целом, которая до компенсации реактивной мощности составила 34153 кВА.

Определены необходимое число и номинальная мощность силовых трансформаторов цеховых КТП. Расчет был произведен на примере моторного цеха №1 для которого были выбраны силовые трансформаторы ТМГ-1600/10 и конденсаторные установки типа АУКРМ 300 квар.

На ГПП предприятия для технико-экономического сравнения были выбраны два варианта: трансформаторы ТДН-16000/110/10 и следующий по шкале номинальных мощностей ТРДН-25000/110/10/10, по наименьшим приведенным затратам был выбран вариант с установкой двух трансформаторов ТДН-16000/110/10.

Определены основные схемные и конструктивные решения по ГПП. Выполнен расчет токов короткого замыкания, на основании результатов которого было выбрано и проверено основное электрооборудование ГПП. Выполнены расчеты заземления ГПП, установлено, что необходимо установить по контуру подстанции 36 вертикальных заземлителей.

Список используемых источников

1. Мастепаненко М.А. Введение в специальность. Электроэнергетика и электротехника : учеб. пособие. Ставрополь : СтГАУ, 2015. 116 с.
2. Справочник инженера по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электрических станций и сетей. Централизованное и автономное электроснабжение объектов, цехов, промыслов, предприятий и промышленных комплексов [Электронный ресурс] : учеб. пособие. Вологда : "Инфра-Инженерия", 2016. 928 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/95768> (дата обращения: 13.03.2018).
3. Хорольский В.Я., Таранов М.А. Надежность электроснабжения : учеб. пособие. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2017. 127 с.
4. Roman K. The Digital Information Age: An Introduction to Electrical Engineering. - Cengage Learning, 2014. 400 p.
5. Непомнящий В.А. Экономические потери от нарушений электроснабжения потребителей [Электронный ресурс]. Электрон. дан. Москва : Издательский дом МЭИ, 2016. 188 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/72323> (дата обращения: 19.02.2018).
6. Luo L., Chang Y., Li Y., Zhou F., Luo R., Long L. A hybrid power conditioner for co-phase power supply system and its capacity analysis // 2017 IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). Chongqing. 2017. pp. 510-515.
7. Матаев У.М. Практикум по электроэнергетике (в примерах с решениями) : учебное пособие. Алматы: Нур-Принт, Казахский национальный аграрный университет, 2014. 195 с.
8. Алиев И.И. Электротехника и электрооборудование : учебное пособие для вузов. Саратов: Вузовское образование, 2014. 1199 с.
9. Старкова Л.Е. Справочник цехового энергетика : учебно-практическое пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2013. 352 с.

10. Balagurov M. V., Korobkov D. V., Bachurin P. A., Mansurov A. R., Surov V. Y., Zharkov M. A. Primary AC power supply system for autonomous objects // 2017 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). Erlagol. 2017. pp. 409-412.
11. Вахнина В.В., Черненко А.Н. Проектирование систем электроснабжения : электронное учеб.-метод. пособие. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2016. 78 с. URL: https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/2976/1/Vahnina%20Chernenko_EUMI_Z.pdf (дата обращения: 07.03.2018).
12. Кулеева Л.И., Митрофанов С.В., Семенова Л.А. Проектирование подстанции : учебное пособие. Оренбург: Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2016. 111 с.
13. Varetsky Y. Reactive power compensation in a powerful DC drives supply system // 2016 Electric Power Networks (EPNet). Szklarska Poreba. 2016. pp. 1-6.
14. Антонов С.Н. Проектирование электроэнергетических систем : учебное пособие. Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет, 2014. 104 с.
15. Ополева Г. Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов : учеб. пособие. М. : ИД «ФОРУМ» : ИНФРА-М, 2018. 416 с.
16. Хорольский В.Я., Таранов М.А., Жданов В.Г. Организация и управление деятельностью электросетевых предприятий: учебное пособие. М.: Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2016. 144 с.
17. Шеховцов В.П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению. 3-е изд. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2017. 136 с.
18. Manusov V. Z., Bumtsend U., Tretyakova E. S. Optimization compensating devices in the power supply systems using population algorithms // 2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST). Novosibirsk. 2016. pp. 276-279.

19. Кудряков А.Г., Сазыкин В.Г. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах : учебник. Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2018. 263 с.

20. Щербаков Е.Ф., Александров Д.С., Дубов А.Л. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях: учебное пособие. М.: Форум, 2014. 496 с.

21. Дьяков А.Ф. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике: учебник для вузов. Москва : Издательский дом МЭИ, 2016. 543 с.