

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 предприятия по выпуску винтовых и поршневых компрессоров»

Студент

М.А. Волков

(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 предприятия по выпуску винтовых и поршневых компрессоров.

При выполнении работы были определены расчетные электрические нагрузки для каждого из цехов предприятия, произведен выбор трансформаторов и конденсаторных установок для цеховых КТП, на основе технико-экономического сравнения двух вариантов выбраны силовые трансформаторы для ГПП предприятия, найдено экономически целесообразное значение напряжения питания предприятия, определены величины токов короткого замыкания, выбрано основное электрооборудование главной понизительной подстанции предприятия, выполнен расчет заземления ГПП.

Бакалаврская работа включает в себя пояснительную записку на 58 листах, которая содержит 4 таблицы и 2 рисунка. Графическая часть работы представлена 6 чертежами формата А1.

Содержание

Введение	4
1 Характеристика объекта проектирования	6
2 Расчет ожидаемых максимальных нагрузок по цехам	9
3 Определение необходимого числа и номинальной мощности силовых трансформаторов цеховых КТП	15
4 Определение необходимого числа и номинальной мощности силовых трансформаторов главной понизительной подстанции	23
5 Выбор схемы ГПП	31
6 Выбор схемы сети внутризаводского электроснабжения	32
7 Определение значений токов короткого замыкания	33
8 Выбор и проверка основного электрооборудования на главной понизительной подстанции	37
9 Расчет заземления ГПП	53
Заключение	56
Список используемых источников	57

Введение

На любом промышленном предприятии, строительной площадке, в сельском хозяйстве, на электрифицированном транспорте, в городах и сельских поселениях невозможно обеспечить высокопроизводительную работу без электроэнергии [1-3].

Электроустановки для выработки и передачи электроэнергии в составе системы электроснабжения промышленного предприятия могут быть как собственностью самого предприятия, так и находиться в собственности другого предприятия.

Наличие собственной электростанции позволяет промышленному предприятию обеспечить электроэнергией свои техпроцессы, передавая электроэнергию по собственным электрическим сетям. Кроме того, предприятие может получать электроэнергию от электрических станций и подстанций, относящихся к электроэнергосистеме или находящихся в собственности другого предприятия.

Наиболее широко распространена схема, согласно которой промышленное предприятие получает электроэнергию от сетей электроэнергосистемы региона, входящей в единую электроэнергосистему. Электрическую энергию получают на электростанциях электроэнергосистемы и передают к месту ее последующего потребления по электрическим сетям на номинальном напряжении 110-220 кВ. На предприятии имеется главная понизительная подстанция, которая понижает напряжение до уровня распределительных сетей промышленного предприятия, который обычно составляет 6-10 кВ. Затем электрическая энергия передается на цеховые трансформаторные подстанции, а от них по проводникам низковольтной распределительной сети к распредпунктам и отдельным электроприемникам.

Основная масса электроприемников участвующих в технологическом процессе промышленного предприятия выпускается на напряжение до 1 кВ.

Систему электроснабжения промышленного предприятия условно можно разделить на 3 подсистемы:

- внешнее электроснабжение промышленного предприятия;
- внутреннее электроснабжение предприятия;
- внутрицеховое электроснабжение.

Кроме того, сама 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 [4-6].

Целью бакалаврской работы является проектирование системы электроснабжения предприятия по выпуску винтовых и поршневых компрессоров, позволяющей обеспечить надежное электроснабжение потребителей и качество электрической энергии.

1 Характеристика объекта проектирования

Предприятие выпускает высокопроизводительные компрессорные установки мощностью до 110 кВт, которые оптимально подходят в качестве источников сжатого воздуха, обладают простотой в установке, так как не нуждаются в подготовке массивной станины и фундамента. Это позволяет отказаться от использования центральной компрессорной станции и минимизировать потери воздуха и затраты на отопление производственных помещений.

Воздушно-винтовые компрессоры производятся в России с использованием всех передовых технических достижений в области оборудования сжатого воздуха. Они интенсивно применяются в пищевой, нефтехимической, автомобильной, фармацевтической отраслях. В модельной линейке предприятия преобладают компрессоры с ременным приводом. Для установок мощностью от 75 кВт применяется прямой привод. В состав конструкций входят винтовые пары немецкого производства и российские моторы, доказавшие свою надежность. Действует стандартная двухгодичная или расширенная пятилетняя гарантия. Сотрудники предприятия самостоятельно осуществляют проектные работы, поставку, монтаж и послепродажное обслуживание воздушных винтовых компрессоров.

Предприятие выпускает безмасляные и масляные компрессоры. Масло может участвовать в отводе тепла, которое образуется при сжатии воздушных масс. В получаемом на выходе воздухе есть минимальные примеси масла, что не критично для большинства производств, машиностроительных цехов. Смазочный материал препятствует образованию коррозии, способствует тихой непрерывной работе установки. Но для нормального функционирования важна его температура. При чрезмерно низкой температуре сжатый воздух выпадает в конденсат и смешивается с маслом. При высокой температуре сокращается ресурс смазочного материала, который теряет свои базовые свойства.

В безмасляных компрессорах воздух сжимается в два этапа. Чтобы избежать перегрева, применяют промежуточный охладитель. Такой винтовой компрессор обладает более высокой стоимостью и требует сложного периодического обслуживания. Несмотря на дороговизну, безмасляные установки широко распространены в пищевой, химической, фармацевтической сферах.

К преимуществам винтовых компрессоров, выпускаемых предприятием, относятся:

- прочный винтовой блок, который, как и другие конструктивные элементы, выдерживает непрерывную, интенсивную работу;
- отсутствие пульсаций давления, что позволяет обходиться без монтажа объемных ресиверов;
- согласно регламенту, компрессорное оборудование винтового типа проходит техническое обслуживание каждые 3000 – 6000 часов. Сервисное и гарантийное обслуживание производят специалисты предприятия;
- высокая устойчивость к перегреву, который в поршневых компрессорах приводит к залеганию колец, потере их производительности;
- высокая энергоэффективность, так как коэффициент полезного действия достигает 95%, что на 20–30% выше, чем у поршневого аналога;
- надежность механической части компрессора, отсутствие деталей, которые быстро изнашиваются;
- полная автоматизация оборудования, что позволяет обходиться без дополнительного обслуживающего персонала;
- содержание частиц масла в сжатом выходном воздухе в 5 раз меньше, чем у поршневого компрессора.

Предприятие осуществляет не только шефмонтаж и пусконаладку, но и ремонт винтовых компрессоров. Все восстановительные процедуры проводятся в соответствии с технологическими нормативами, используется специнструмент и оригинальные детали. Компрессорное оборудование осматривается на предмет воздухопотерь, после чего принимается решение о

модернизации системы. Для обнаружения поломки агрегат подвергают диагностике и дефектовке. По мере необходимости устанавливаются новые детали и расходные материалы.

На предприятии размещаются 16 производственных цехов и зданий, большинство электроприемников получает питание на напряжении 0,4 кВ, но имеется 4 синхронных электродвигателя с номинальным напряжением питания 10 кВ в компрессорной.

2 Расчет ожидаемых максимальных нагрузок по цехам

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.

Зачастую на стадии проектирования системы электроснабжения окончательные характеристики приемников электроэнергии могут быть не определены, поэтому для нахождения значений расчетной электрической нагрузки используют различные методы расчета, которые принято делить на основные методы и вспомогательные [7-9].

Расчет ожидаемых электрических нагрузок выполняем в следующей последовательности [10]:

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:

$$K_{и.гр} = \frac{\sum P_{см}}{\sum P_{н.з}} \quad (2.1)$$

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 $n_{\text{Э}}$ и K_{II} .

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

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

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

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

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	930	71.54	13	0.15	0.55	1.52	139.5	211.83	2	279.00	211.83	350.30
2	1790	198.89	9	0.3	0.6	1.33	537	716.00	1.55	832.35	716.00	1097.94
3	3045	126.88	24	0.13	0.6	1.33	395.85	527.80	1.5	593.78	527.80	794.44
4	4050	139.66	29	0.15	0.65	1.17	607.5	710.25	1.36	826.20	781.27	1137.10
5	1450	58.00	25	0.5	0.75	0.88	725	639.39	1.17	848.25	639.39	1062.24
6	740	61.67	12	0.73	0.85	0.62	540.2	334.79	1.15	621.23	368.26	722.18
7	730	91.25	8	0.62	0.8	0.75	452.6	339.45	1.3	588.38	373.40	696.86
8	2300	74.19	31	0.77	0.75	0.88	1771	1561.88	1.03	1824.13	1718.06	2505.83

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
9	2450	17.75	138	0.35	0.65	1.17	857.5	1002.53	1.02	874.65	1102.78	1407.53
10	2040	13.60	150	0.38	0.45	1.98	775.2	1538.39	1.02	790.70	1692.23	1867.85
11	3450	69.00	50	0.18	0.55	1.52	621	942.98	1.13	701.73	1037.27	1252.34
12	220	13.75	16	0.73	0.55	1.52	160.6	243.87	1.12	179.87	268.25	322.98
13	75	5.77	13	0.43	0.6	1.33	32.25	43.00	1.36	43.86	47.30	64.51
14	3210	64.20	50	0.45	0.6	1.33	1444.5	1926.00	1.1	1588.95	2118.60	2648.25
15	400	17.39	23	0.33	0.65	1.17	132	154.33	1.28	168.96	169.76	239.51
16	2740	26.35	104	0.2	0.5	1.73	548	949.16	1.12	613.76	1044.08	1211.12

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
Итого по 0,4 кВ	29620	5.8...199	695	0.33	-	1.22	9739.7	11841.63	-	11375.80	12816.29	17136.69
7	6400	1600	4	0.7	0.9	-0.48	4480	-2169.76	1.1	4928.00	-2169.76	5384.52
Итого по 10 кВ	6400	630...1250	4	0.70	-	-0.48	4480	-2169.76	-	4928.00	-2169.76	5384.52
Всего по предприятию	36020	5.8...1600	699	0.39	-	0.68	14220	9671.865	-	16303.8	10646.5	19472.09

3 Определение необходимого числа и номинальной мощности силовых трансформаторов цеховых КТП

3.1 Выбор трансформаторов КТП на примере ремонтно-механического цеха

Найдем необходимую мощность силового трансформатора КТП по формуле [11]:

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

$$S_{HT} > \frac{169}{0,7 \cdot 2} = 121 \text{ кВА.}$$

По шкале номинальных мощностей трансформаторов выбираем самое близкое большее значение $S_{HT} = 160 \text{ кВА}$.

3.1.1 Вариант с силовым трансформатором ТМГ-160

По данным производителя силового трансформатора определяем его паспортные данные: $\Delta P_{XX} = 0.44 \text{ кВт}$, $\Delta P_{K3} = 2.54 \text{ кВт}$, $i_{XX} = 2.32 \%$, $u_{K3} = 4.6 \%$, $K_T = 110 \text{ тыс. руб.}$

Произведем расчет потерь в трансформаторе:

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

$$\Delta P_{mp} = 2 \cdot 0.44 + 0.7^2 \cdot 2.54 = 3.37 \text{ кВт},$$

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

$$\Delta Q_{mp} = 2 \cdot 2.32 + 0.7^2 \cdot 4.6 \cdot \frac{160}{100} = 14.64 \text{ квар.}$$

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

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

$$P_p = 169 + 3.37 = 172.3 \text{ кВт},$$

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

$$Q_p = 169.8 + 14.64 = 184.4 \text{ квар}.$$

Рассчитаем реактивную мощность в период минимальных нагрузок:

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

$$Q_{\min} = 0.5 \cdot 184.4 = 92.2 \text{ квар}.$$

Определим экономически выгодное значение реактивной мощности в период максимальных нагрузок в энергосистеме [12]:

$$Q'_{\text{э1}} = Q_p - 0.7 Q_{\text{сд}}, \quad (3.7)$$

$$Q'_{\text{э1}} = 184.4 - 0.7 \cdot 0 = 184.4 \text{ квар},$$

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

$$Q''_{\text{э1}} = 0.28 \cdot 172.3 = 48.3 \text{ квар}.$$

где $\alpha = 0.28$; $Q_{\text{сд}} = 0$.

Принимаем наименьшее значение $Q_{\text{э1}} = 48.3 \text{ квар}$.

Определим экономически целесообразные значения реактивной мощности в часы минимальных нагрузок:

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

$$Q_{\text{э2,в}} = 92.2 - 184.4 - 48.3 = -43.9 \text{ квар};$$

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

$$Q_{\text{э2,н}} = 92.2 + 0 = 92.2 \text{ квар};$$

где $Q_{\text{к}} = 0$.

Из-за повышенного уровня напряжения в период минимального потребления мощности принимаем наибольшее значение: $Q_{\text{э2}} = 92.2 \text{ квар}$.

Определяем суммарное значение мощности конденсаторных установок:

$$Q_{\text{куmax}} = 1,15 \cdot Q_{\text{р}} - Q_{\text{э1}}, \quad (3.11)$$

$$Q_{\text{куmax}} = 1,15 \cdot 184.4 - 48.3 = 163.8 \text{ квар}.$$

Из них мощность нерегулируемых КУ составит:

$$Q_{\text{куmin}} = Q_{\text{min}} - Q_{\text{э2}}, \quad (3.12)$$

$$Q_{\text{куmin}} = 92.2 - 92.2 = 0.$$

То есть все КУ должны регулироваться.

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

$$Q_{\text{эн}} = Q_{\text{э1}} - (Q_{\text{р}} - Q_{\text{р}\Sigma}), \quad (3.13)$$

$$Q_{\text{эн}} = 48.3 - 184.4 - 169.8 = 33.6 \text{ квар}.$$

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

$$Q_{\text{Т}} = \sqrt{(N_{\text{Т}} K_{\text{з}} S_{\text{Н}})^2 - P_{\text{р}\Sigma}^2}, \quad (3.14)$$

$$Q_T = \sqrt{(2 \cdot 0.7 \cdot 160)^2 - 169^2} = 147.1 \text{ квар},$$

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

$$Q_{KVH} = 169.8 - 147.1 = 22.7 < 50 \text{ квар},$$

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

$$Q_{.KVB} = 163.8 - 22.7 = 141.1 < 800 \text{ квар}.$$

Так как $Q_{KVH} < 50$ квар и $Q_{.KVB} < 800$ квар, то размещение низковольтных и высоковольтных КУ нецелесообразно.

Принимаем к установке цеховую КТП с двумя силовыми трансформаторами ТМГ-160/10 без конденсаторных установок.

Определим продолжительность периода максимальных потерь

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

$$\tau = \left(0,124 + \frac{5100}{10000} \right)^2 \cdot 8760 = 3521.1 \text{ ч.}$$

Определим удельную стоимость потерь на холостом ходу в силовом трансформаторе:

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

$$C_{XX} = \left(\frac{597 \cdot 12}{5100} + 1.4 \right) \cdot 8760 = 24.569 \text{ тыс.руб/кВт}.$$

Определим удельную стоимость потерь короткого замыкания в силовом трансформаторе:

$$C_{K3} = \left(\frac{\alpha \cdot 12}{T_M} + \beta \right) \cdot \tau, \quad (3.19)$$

$$C_{K3} = \left(\frac{597 \cdot 12}{5100} + 1.4 \right) \cdot 3521.1 = 9.876 \text{ тыс.руб/кВт}.$$

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

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

$$C \cdot \Delta P_T = 24.569 \cdot 0.44 + 9.876 \cdot 0.7^2 \cdot 2.54 = 23.102 \text{ тыс.руб.}$$

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

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

$$Z_{КТП} = 0.223 \cdot (110 \cdot 2) + (23.102 \cdot 2) = 95.264 \text{ тыс.руб.}$$

3.1.2 Вариант с силовым трансформатором ТМГ-250

По данным производителя силового трансформатора определяем его паспортные данные: $\Delta P_{XX} = 0.54 \text{ кВт}$, $\Delta P_{K3} = 3.08 \text{ кВт}$, $i_{XX} = 2.23 \%$, $u_{K3} = 4.47 \%$, $K_T = 160 \text{ тыс.руб}$.

Произведем расчет потерь в трансформаторе:

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

$$\Delta P_{mp} = 2 \cdot 0.54 + 0.7^2 \cdot 3.08 = 4.1 \text{ кВт},$$

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

$$\Delta Q_{mp} = 2 \cdot 2.23 + 0.7^2 \cdot 4.47 \cdot \frac{250}{100} = 22.1 \text{ квар.}$$

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

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

$$P_p = 169 + 4.1 = 173.1 \text{ кВт},$$

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

$$Q_p = 169.8 + 22.1 = 191.9 \text{ квар}.$$

Рассчитаем реактивную мощность в период минимальных нагрузок:

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

$$Q_{\min} = 0.5 \cdot 191.9 = 95.9 \text{ квар}.$$

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

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

$$Q'_{\text{э1}} = 191.9 - 0.7 \cdot 0 = 191.9 \text{ квар},$$

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

$$Q''_{\text{э1}} = 0.28 \cdot 173.1 = 48.5 \text{ квар}.$$

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

Принимаем наименьшее значение $Q_{\text{э1}} = 48.5 \text{ квар}$.

Определим экономически целесообразные значения реактивной мощности в часы минимальных нагрузок:

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

$$Q_{\text{э2,в}} = 95.9 - 191.9 - 48.5 = -47.5 \text{ квар};$$

$$Q_{\varepsilon 2, H} = Q_{\min} + Q_K, \quad (3.30)$$

$$Q_{\varepsilon 2, H} = 95.9 + 0 = 95.9 \text{ квар};$$

где $Q_K = 0$.

Из-за повышенного уровня напряжения в период минимального потребления мощности принимаем наибольшее значение: $Q_{\varepsilon 2} = 95.9 \text{ квар}$.

Определяем суммарное значение мощности конденсаторных установок:

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

$$Q_{\text{КУ max}} = 1,15 \cdot 191.9 - 48.5 = 172.2 \text{ квар}.$$

Из них мощность нерегулируемых КУ составит:

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

$$Q_{\text{КУ min}} = 95.9 - 95.9 = 0.$$

То есть все КУ должны регулироваться.

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

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

$$Q_{\varepsilon H} = 48.5 - 191.9 - 169.8 = 26.4 \text{ квар}.$$

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

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

$$Q_T = \sqrt{(2 \cdot 0.7 \cdot 250)^2 - 169^2} = 306.5 \text{ квар},$$

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

$$Q_{KVH} = 169.8 - 306.5 = -136.8 < 50 \text{ квар},$$

$$Q_{.KVB} = Q_{KV \max} - Q_{KVH}, \quad (3.36)$$

$$Q_{.KVB} = 172.2 + 136.8 = 308.9 < 800 \text{ квар}.$$

Так как $Q_{KVH} < 50$ квар и $Q_{.KVB} < 800$ квар, то размещение низковольтных и высоковольтных КУ нецелесообразно.

Принимаем к установке цеховую КТП с двумя силовыми трансформаторами ТМГ-250/10 без конденсаторных установок.

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

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

$$C \cdot \Delta P_T = 24.569 \cdot 0.54 + 9.876 \cdot 0.7^2 \cdot 3.08 = 28.172 \text{ тыс.руб.}$$

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

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

$$Z_{КТП} = 0.223 \cdot (160 \cdot 2) + (28.172 \cdot 2) = 127.704 \text{ тыс.руб.}$$

По минимуму приведенных затрат на основное оборудование КТП принимаем к установке 2х трансформаторную подстанцию с силовыми трансформаторами ТМГ-160/10.

Для остальных цехов предприятия выбор трансформаторов КТП производим аналогичным образом.

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

Для электрических сетей классов напряжения 110-220 кВ рекомендуется применять силовые трансформаторы с:

- низким уровнем удельных технических потерь;
- микропроцессорными блоками управления устройством РПН;
- твердыми вводами при значениях номинального тока до 2000 А;
- нормативным сроком службы не менее 30 лет.

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 [13, 14].

Величину рационального напряжения питания предприятия можно определить по формуле:

$$U_{РАЦ} = 4.34 \cdot \sqrt{L + 0.016 \cdot P_{РП}}, \quad (4.1)$$
$$U_{РАЦ} = 4.34 \cdot \sqrt{7 + 0.016 \cdot 16304} = 71 \text{ кВ},$$

где расчетная активная нагрузка предприятия определяется:

$$P_{РП} = P_{РН} + P_{РВ} + P_{СТОП}, \quad (4.2)$$
$$P_{РП} = 11375.8 + 4928 + 0 = 16304 \text{ кВт}.$$

Полную расчетную нагрузку предприятия определим по формуле:

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

$$S_{PI} = \sqrt{16304^2 + 4076^2} = 16806 \text{ кВА},$$

где величину расчетной реактивной нагрузки предприятия найдем по формуле:

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

$$Q_{ЭСi} = 16304 \cdot 0.25 = 4076 \text{ квар.}$$

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.

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

$$S_{номт} \approx 0,8 \cdot 16806 \cdot \frac{1}{1,4} = 9603 \text{ кВА.}$$

По шкале номинальных мощностей силовых трансформаторов и каталогу производителя выбираем для дальнейшего рассмотрения два варианта: трансформаторы ТДН-10000/110/10 и следующий по шкале номинальных мощностей ТДН-16000/110/10.

4.1 Вариант установки на ГПП предприятия двух силовых трансформаторов ТДН - 10000/110/10

По сайту производителя силового трансформатора определяем его паспортные данные: $\Delta P_{XX} = 14.5 \text{ кВт}$, $\Delta P_{КЗ} = 58.3 \text{ кВт}$, $i_{XX} = 0.91 \%$, $u_{КЗ} = 10.5 \%$, $K_T = 20257 \text{ тыс. руб.}$

Найдем значение приведенных потерь активной мощности в силовом трансформаторе на холостом ходу по формуле [15]:

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

$$\Delta P_x' = 14.5 + 0,05 \cdot 91 = 19.05 \text{ кВт},$$

где

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

$$\Delta Q_x = 0.91 + 10000 / 100 = 91 \text{ квар},$$

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

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

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

$$\Delta Q_k = 10.5 \cdot 10000 / 100 = 1050 \text{ квар},$$

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

$$\Delta P_k' = 58.3 + 0.05 \cdot 1050 = 110.8 \text{ кВт}.$$

Значение коэффициента загрузки трансформатора найдем по формуле:

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

$$K_z = \frac{16806}{10000} = 1.681 .$$

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

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

$$P_m^{\dot{}} = 19.05 + 1.681^2 \cdot 110.8 = 332 \text{ кВт.}$$

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

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

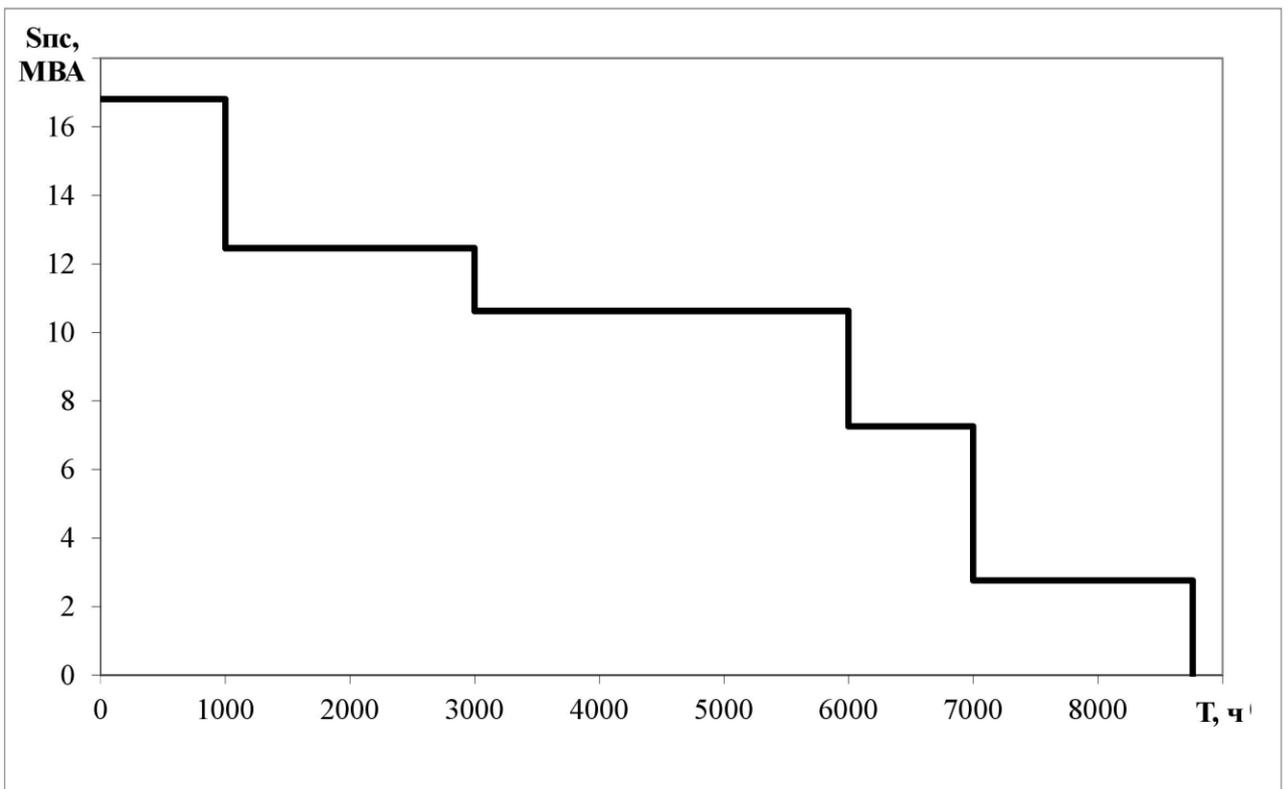


Рисунок 4.1 – Суммарный годовой график нагрузки подстанции предприятия

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	16,806	1000	1,681	156473	38100
2	12,455	2000	1,246	171882	76200
3	10,625	3000	1,062	187624	114300
4	7,264	1000	0,726	29231	38100
5	2,763	1760	0,276	7446	67056
		$\Sigma \Delta W_{\kappa Bi} = 552655$		$\Sigma \Delta W_{xi} = 333756$	

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

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

$$I_{\Delta W_{ПТС}} = (552655 + 333756) \cdot 2.805 = 2486 \text{ тыс. руб.}$$

где $C_{\text{э}} = 2.805 \text{ руб} / \text{кВт} \cdot \text{ч}$ - стоимость 1 кВт·ч потерь электрической энергии.

Определим значение суммарных приведенных затрат на ГПП по формуле [16]:

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

$$Z_{\text{прив}} = 0.25 \cdot 40513.33 + 3808 + 2486 = 16423 \text{ тыс. руб.}$$

где $K = 2 \cdot 20256.67 = 40513.33 \text{ тыс. руб.}$ – цена за два силовых трансформатора ТДН-10000/110;

$$I_{\text{э}} = P_{\text{сум}} \cdot K = 0,094 \cdot 40513.33 = 3808 \text{ тыс. руб.}$$
 – годовые отчисления.

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

По сайту производителя силового трансформатора определяем его паспортные данные: $\Delta P_{xx} = 18.3 \text{ кВт}$, $\Delta P_{кз} = 85.5 \text{ кВт}$, $i_{xx} = 0.72 \%$, $u_{кз} = 10.5 \%$, $K_T = 24308 \text{ тыс. руб.}$

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

$$\Delta P_x' = \Delta P_x + K_{un} \cdot \Delta Q_x, \quad (4.15)$$
$$\Delta P_x' = 18.3 + 0.05 \cdot 115.2 = 24.06 \text{ кВт},$$

где

$$\Delta Q_x = I_{xx\%} \cdot S_{ном.т} / 100, \quad (4.16)$$
$$\Delta Q_x = 0.72 \cdot 16000 / 100 = 115.2 \text{ квар},$$
$$K_{un} = 0,05 \text{ кВт / квар}.$$

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

$$\Delta Q_{к} = u_{к\%} \cdot S_{ном.т} / 100, \quad (4.17)$$
$$\Delta Q_{к} = 10.5 \cdot 16000 / 100 = 1680 \text{ квар},$$
$$\Delta P_{к}' = \Delta P_{к} + K_{un} \cdot \Delta Q_{к}, \quad (4.18)$$
$$\Delta P_{к}' = 85.5 + 0.05 \cdot 1680 = 169.5 \text{ кВт}.$$

Значение коэффициента загрузки трансформатора найдем по формуле:

$$K_3 = \frac{S_{нагр}}{S_{ном,Т}}, \quad (4.19)$$

$$K_3 = \frac{16806}{16000} = 1.05 .$$

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

$$P_m^{\dot{}} = \Delta P_x^{\dot{}} + K_3^2 \cdot \Delta P_k^{\dot{}}, \quad (4.20)$$

$$P_m^{\dot{}} = 24.06 + 1.05^2 \cdot 169.5 = 211.07 \text{ кВт}.$$

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

$$\Delta W = \sum n_i \cdot \Delta P_x' \cdot T_i + \sum \frac{1}{n_i} \cdot K_{3\sigma}^2 \cdot \Delta P_k' \cdot T_i = \Delta W_x + \Delta W_k \quad (4.21)$$

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} , MVA	T_i , ч	K_{3Bi}	$\Delta W_{кBi}$, кВт·ч	ΔW_{xi} , кВт·ч
1	16.806	1000	1.050	93504	48120
2	12.455	2000	0.778	102712	96240
3	10.625	3000	0.664	112119	144360
4	7.264	1000	0.454	17467	48120
5	2.763	1760	0.173	4449	84691
		$\Sigma \Delta W_{кBi} = 330251$		$\Sigma \Delta W_{xi} = 421531$	

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

$$I_{\Delta W_{ПТС}} = \Delta W_{nc} \cdot C_{\text{э}}, \quad (4.22)$$

$$I_{\Delta W_{ПТС}} = (330251 + 421531) \cdot 2.805 = 2109 \text{ тыс. руб.}$$

где $C_{\text{э}} = 2.805 \text{ руб} / \text{кВт} \cdot \text{ч}$ - стоимость 1 кВт·ч потерь электрической энергии.

Определим значение суммарных приведенных затрат на ГПП по формуле:

$$Z_{\text{прив}} = E_n \cdot K + I = E_n \cdot K + I_{\text{э}} + I_{\Delta W_{ПТС}}, \quad (4.23)$$

$$Z_{\text{прив}} = 0.25 \cdot 48616 + 4570 + 2109 = 18833 \text{ тыс. руб.}$$

где $K = 2 \cdot 24308 = 48616 \text{ тыс. руб.}$ – цена за два силовых трансформатора ТДН-16000/110;

$$I_{\text{э}} = P_{\text{сум}} \cdot K = 0,094 \cdot 48616 = 4570 \text{ тыс. руб.}$$
 – годовые отчисления.

По минимальным приведенным затратам выбираем к установке на ГПП первый вариант с силовыми трансформаторами ТДН- 10000/110/10.

5 Выбор схемы ГПП

Самыми современными решениями на сегодняшний день являются:

1. Для распределительных устройств 110 кВ возможно открытое или закрытое исполнение, в том числе модульное. В закрытом РУ 110 кВ должны, как правило, устанавливаться комплектные распределительные устройства с элегазовой изоляцией (КРУЭ). На реконструируемых подстанциях, расположенных в труднодоступных районах, в условиях загрязненной атмосферы или на площадках с высокой стоимостью земли, целесообразно применение КРУЭ.

2. 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, а при наличии и трансформаторов на подстанции расщепленной обмотки низкого напряжения использовать двойную секционированную систему шин.

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 ТН, то должны приниматься меры по недопущению резонансных перенапряжений в цепях ТН.

Не рекомендуется применять разъединители с ручным приводом при классе напряжения 110 кВ.

Не разрешается применять на вновь возводимы ГПП воздушные и маломасляные ВВ, а также пневматические приводы к ВВ [13, 17].

6 Выбор схемы сети внутризаводского электроснабжения

При выборе определенной схемы должны учитываться конструктивное выполнение сетей, выбранные способы передачи электрической энергии внутри объекта, необходимо учитывать также значение токов КЗ.

Радиальные схемы обычно применяют двухступенчатыми: 1-я ступень - РУ 6-10 кВ; 2-я ступень - КТП. На небольших по мощности промышленных и непромышленных объектах применяются одноступенчатые схемы распределения электроэнергии, когда КТП подключаются непосредственно к источнику питания напряжением 6-10 кВ.

Магистральные схемы, как правило, применяются для запитки от одной магистральной линии до 5-6 трансформаторных подстанций с общей установленной мощностью силовых трансформаторов не более 5-6 МВА. Магистральные схемы по сравнению с радиальными обладают меньшей надежностью, но дают возможность уменьшить число коммутационных аппаратов высокого напряжения.

Разновидностью магистральных схем являются схемы двойных сквозных магистралей, которые могут использоваться для питания потребителей любой категории по надежности электроснабжения.

Чаще всего, на одном объекте крупные и ответственные потребители основных производств и электроприемники запитываются по радиальной схеме и схемам двойных сквозных магистралей. Неответственные потребители и потребители небольшой мощности могут подключаться по магистральным схемам. Комплексное использование радиальных и магистральных схем дает возможность выполнить схему распределительной сети с получением наилучших технико-экономических параметров [13, 18].

7 Расчет токов короткого замыкания

Для определения значений токов короткого замыкания составляем две схемы: расчетную и схему замещения, которые изображены на рисунке 7.1.

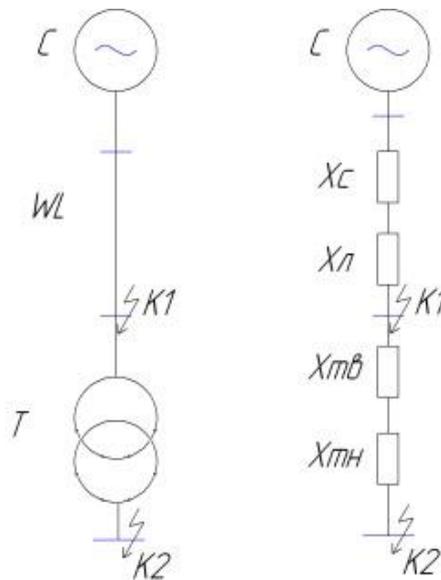


Рисунок 7.1 - Расчётная и схема замещения для определения значений токов короткого замыкания

Параметры, необходимые для определения значений токов КЗ:

Параметры внешней ЭЭС: $U_{cp} = 115$ кВ; $S_{\delta} = 1000$ МВА; $S_{\kappa} = 2900$ МВА.

Параметры питающей воздушной линии электропередачи:

$x_{y\delta} = 0,4$ Ом/км; $L = 7$ км.

Параметры выбранного к установке на ГПП силового трансформатора:

$S_n = 10$ МВА; $U_{\kappa} = 10,5$ %.

Определим сопротивление системы по формуле [19]:

$$x_{c.\delta} = \frac{S_{\delta}}{S_{\kappa}}; \quad (7.1)$$

$$x_{c.\delta} = \frac{1000}{2900} = 0.345.$$

Определим сопротивление воздушной линии электропередачи по формуле:

$$x_{ВЛ.б} = \frac{x_{уд}}{2} \cdot L \cdot \frac{S_{б}}{U_{сн}^2}; \quad (7.2)$$

$$x_{ВЛ.б} = \frac{0.4}{2} \cdot 7 \cdot \frac{1000}{115^2} = 0.106.$$

Определим сопротивление принятого к установке на ГПП силового трансформатора ТДН-10000/110/10 по формуле:

$$x_{Т.б} = \frac{U_{к, \%}}{100} \cdot \frac{S_{б}}{S_{н}}; \quad (7.3)$$

$$x_{Т.б} = \frac{10.5}{100} \cdot \frac{1000}{10} = 10.5.$$

7.1 Расчет для точки К1

Определим суммарное сопротивление цепи:

$$x_{рез1} = x_{с.б} + x_{ВЛ.б}; \quad (7.4)$$

$$x_{рез1} = 0.345 + 0.106 = 0.451.$$

Найдем значение базисного тока:

$$I_{б.к1} = \frac{S_{б}}{\sqrt{3} \cdot U_{сн}}; \quad (7.5)$$

$$I_{б.к1} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 5.02 \text{ кА};$$

Определим начальное действующее значение трехфазного тока короткого замыкания по формуле:

$$I_{\kappa 1} = \frac{E_{\sigma}}{x_{\text{рез}1}} \cdot I_{\sigma}; \quad (7.6)$$

$$I_{\kappa 1} = \frac{1}{0.451} \cdot 5.02 = 11.14 \text{ кА};$$

Определим значение ударного тока КЗ:

$$i_{\text{уд.}\kappa 1} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{н.о}}^3 \cdot K_{\text{уд}}; \quad (7.7)$$

$$i_{\text{уд.}\kappa 1} = \sqrt{2} \cdot 11.14 \cdot 1.8 = 28.357 \text{ кА}.$$

7.2 Расчет для точки К2

Определим суммарное сопротивление цепи:

$$x_{\text{рез}2} = x_{\text{рез}1} + x_{\text{Т.}\sigma}; \quad (7.8)$$

$$x_{\text{рез}2} = 0.451 + 10.5 = 10.951.$$

Найдем значение базисного тока:

$$I_{\sigma.\kappa 2} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{сн}}}; \quad (7.9)$$

$$I_{\sigma.\kappa 2} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10.5} = 54.986 \text{ кА};$$

Определим начальное действующее значение трехфазного тока короткого замыкания по формуле:

$$I_{\kappa 2}^3 = \frac{E_{\sigma}^{\wedge}}{x_{\text{рез}2}} \cdot I_{\sigma.\kappa 2}; \quad (7.10)$$

$$I_{\kappa 2}^3 = \frac{1}{10.951} \cdot 54.986 = 5.021 \text{ кА};$$

Определим значение ударного тока КЗ:

$$i_{\text{уд.}\kappa 2} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{н.о}}^3 \cdot K_{\text{уд}}; \quad (7.11)$$

$$i_{\text{уд.}\kappa 2} = \sqrt{2} \cdot 5.021 \cdot 1.85 = 13.137 \text{ кА}.$$

Результаты определения значений токов короткого замыкания заносим в таблицу 7.1.

Таблица 7.1 – Результаты определения значений токов короткого замыкания

№ точки КЗ	$U_{\text{сн}}$, кВ	$K_{\text{уд}}$	$I_{\kappa}^{\text{о}}$, кА	$i_{\text{уд}}$, кА
1	115	1,8	11,1	28,4
2	10,5	1,85	5	13,1

8 Выбор и проверка основного электрооборудования на главной понизительной подстанции

8.1 Выбор электрических аппаратов на стороне 110 кВ

8.1.1 Выбор высоковольтного выключателя

На стороне высокого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем высоковольтный выключатель (ВВ) типа ВГП-110-20/2500 УХЛ1.

ВВ выбираем и проверяем по следующим условиям [20]:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (8.1)$$
$$110 \text{ кВ} \leq 110 \text{ кВ};$$

- значению номинального тока:

$$I_{max} < I_n, \quad (8.2)$$
$$70 \text{ А} < 2500 \text{ А},$$

где

$$I_{max} = 1.4 \cdot \frac{S_{н.Т}}{\sqrt{3} \cdot U_{сн}}, \quad (8.3)$$
$$I_{max} = 1.4 \cdot \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 70 \text{ А};$$

- коммутационной способности:

$$I_{к1} \leq I_{откл.н}, \quad (8.4)$$

$$11.1 \text{ кА} \leq 20 \text{ кА},$$

$$i_{a,\tau} \leq i_{a.n.}, \quad (8.5)$$

$$9.5 \text{ кА} \leq 12.7 \text{ кА},$$

где

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{\kappa 1} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}}, \quad (8.6)$$

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot 11.1 \cdot e^{\frac{-0.05}{0.1}} = 9.5 \text{ кА},$$

$$i_{a.n.} = \sqrt{2} \cdot \beta_n / 100 \cdot I_{откл.н}, \quad (8.7)$$

$$i_{a.n.} = \left(\sqrt{2} \cdot \frac{45}{100} \right) \cdot 20 = 12.7 \text{ кА},$$

- электродинамической стойкости:

$$I_{\kappa 1} \leq I_{np.c}, \quad (8.8)$$

$$11.1 \text{ кА} \leq 20 \text{ кА};$$

$$i_{y\delta} \leq i_{np.c}, \quad (8.9)$$

$$28.4 \text{ кА} \leq 100 \text{ кА};$$

- термической стойкости:

$$B_{\kappa} \leq I_{терм}^2 \cdot t_{откл}, \quad (8.10)$$

$$24.6 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 62.5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

Принятый к установке на стороне высокого напряжения на ГПП высоковольтный выключатель типа ВГП-110-20/2500 УХЛ1 прошел необходимые проверки.

8.1.2 Выбор разъединителя

На стороне высокого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем разъединитель типа РГП-110/1250 УХЛ1.

Разъединитель выбираем и проверяем по следующим условиям:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (8.11)$$
$$110 \text{ кВ} \leq 110 \text{ кВ};$$

- значению номинального тока:

$$I_{max} < I_n, \quad (8.12)$$
$$70 \text{ А} < 1250 \text{ А},$$

- электродинамической стойкости:

$$i_{уд} \leq i_{нр.с}, \quad (8.13)$$
$$28.4 \text{ кА} \leq 80 \text{ кА};$$

- термической стойкости:

$$B_k \leq I_{нр.с}^2 \cdot t_{нр.с}, \quad (8.14)$$
$$24.6 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 40 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Принятый к установке на стороне высокого напряжения на ГПП разъединитель типа РГП-110/1250 УХЛ1 прошел необходимые проверки.

8.1.3 Выбор трансформатора тока

На стороне высокого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем трансформатор тока типа ТВТ-110-1-100/5.

Трансформатор тока выбирается и проверяется по:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (8.15)$$
$$110 \text{ кВ} \leq 110 \text{ кВ};$$

- значению номинального тока:

$$I_{\max} \leq I_{Н.ТТ}, \quad (8.16)$$
$$70 \text{ А} \leq 100 \text{ А};$$

- электродинамической стойкости:

$$i_{уд} \leq i_{э\text{лдин.ст}}, \quad (8.17)$$
$$28.4 \text{ кА} \leq 80 \text{ кА};$$

- термической стойкости:

$$B_k \leq K_T^2 \cdot I_{1\text{ном.}}^2 \cdot t_{откл} = I_T^2 \cdot t_{откл}, \quad (8.18)$$
$$24.6 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 250 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

- величине вторичной нагрузки:

$$Z_2 \leq Z_{2\text{ном}}, \quad (8.19)$$

где $Z_2 \approx R_2$

$$R_2 = R_{\text{приб}} + R_{\text{пр}} + R_{\text{к}}, \quad (8.20)$$

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

$$R_{\text{приб}} = \frac{S_{\text{приб}}}{I_2^2}, \quad (8.21)$$

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

Значение максимально допустимого сопротивления проводов составит:

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

$$R_{\text{пр}} = 1.2 - 0.004 - 0.1 = 1.1 \text{ Ом}.$$

Определим минимально допустимое сечение медного провода:

$$s = \frac{\rho \cdot l_p}{R_{\text{пр}}}, \quad (8.22)$$

$$s = \frac{0.0175 \cdot 65}{1.1} = 1.04 \text{ мм}^2.$$

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

Принятый к установке на стороне высокого напряжения на ГПП трансформатор тока типа ТВТ-110-1-100/5 прошел необходимые проверки.

8.1.4 Выбор гибких шин

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

Определим необходимое сечение провода:

$$s = \frac{I_{\text{раб.ном}}}{j_{\text{э}}}; \quad (8.23)$$

$$s = \frac{50}{1} = 50 \text{ мм}^2.$$

Принимаем провода АС-50/8 мм² с максимальным значением продолжительного тока 210 А.

Определим наибольшую критическую напряженность электрического поля:

$$E_0 = 30.3 \cdot m \cdot \left(1 + \frac{0.299}{\sqrt{r_0}} \right); \quad (8.24)$$

$$E_0 = 30.3 \cdot 0.82 \cdot \left(1 + \frac{0.299}{\sqrt{0.48}} \right) = 35.6 \text{ кВ/м.}$$

Определим значение напряженности вблизи проводника:

$$E = \frac{0.354 \cdot U_n}{r_0 \cdot \lg \frac{1.26 \cdot D}{r_0}}; \quad (8.25)$$

$$E = \frac{0.354 \cdot 115}{0.48 \cdot \lg \frac{1.26 \cdot 300}{0.48}} = 29.3 \text{ кВ/м.}$$

Проверим на отсутствие короны:

$$1.07E \leq 0.9E_o; \quad (8.26)$$

$$31.3 \text{ кВ/м} < 32 \text{ кВ/м.}$$

Принятый к установке на стороне высокого напряжения на ГПП в качестве гибких шин провод типа АС-50/8 прошел необходимые проверки.

8.2 Выбор электрических аппаратов на стороне 10 кВ

8.2.1 Выбор высоковольтного выключателя

На стороне низкого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем ВВ типа ВВУ-СЭЦ-П-10-31.1/1600.

ВВ выбираем и проверяем по следующим условиям:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (8.27)$$

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- значению номинального тока:

$$I_{max} < I_n, \quad (8.28)$$

$$770 \text{ А} < 1600 \text{ А},$$

где

$$I_{max} = 1.4 \cdot \frac{S_{н.Т}}{\sqrt{3} \cdot U_{сн}}, \quad (8.29)$$

$$I_{max} = 1.4 \cdot \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 10.5} = 770 \text{ А};$$

- коммутационной способности:

$$I_{к1} \leq I_{откл.н}, \quad (8.30)$$

$$5 \text{ кА} \leq 20 \text{ кА},$$

$$i_{a,\tau} \leq i_{a.н}, \quad (8.31)$$

$$4.3 \text{ кА} \leq 12.7 \text{ кА},$$

где

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{к1} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}}, \quad (8.32)$$

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot 5 \cdot e^{\frac{-0.04}{0.08}} = 4.3 \text{ кА},$$

$$i_{a.н} = \sqrt{2} \cdot \beta_n / 100 \cdot I_{откл.н}, \quad (8.33)$$

$$i_{a.н} = \left(\sqrt{2} \cdot \frac{45}{100} \right) \cdot 20 = 12.7 \text{ кА},$$

- электродинамической стойкости:

$$I_{к1} \leq I_{пр.с}, \quad (8.34)$$

$$5 \text{ кА} \leq 20 \text{ кА};$$

$$i_{yд} \leq i_{пр.с}, \quad (8.35)$$

$$13.1 \text{ кА} \leq 50 \text{ кА};$$

- термической стойкости:

$$B_k \leq I_{терм}^2 \cdot t_{откл}, \quad (8.36)$$

$$4.3 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 36 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Принятый к установке на низкого высокого напряжения на ГПП высоковольтный выключатель типа ВВУ-СЭЩ-П-10-31.1/1600 прошел необходимые проверки.

8.2.2 Выбор трансформатора тока

На стороне низкого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем трансформатор тока типа ТОЛ-СЭЩ-10-1000/5.

Трансформатор тока выбирается и проверяется по:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (8.37)$$
$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- значению номинального тока:

$$I_{\max} \leq I_{н.т.т.}, \quad (8.38)$$
$$770 \text{ А} \leq 1000 \text{ А};$$

- электродинамической стойкости:

$$i_{уд} \leq i_{э.дин.ст}, \quad (8.39)$$
$$13.1 \text{ кА} \leq 100 \text{ кА};$$

- термической стойкости:

$$B_k \leq K_T^2 \cdot I_{1ном.}^2 \cdot t_{откл} = I_T^2 \cdot t_{откл}, \quad (8.40)$$
$$4.3 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 144 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

- величине вторичной нагрузки:

$$Z_2 \leq Z_{2ном} , \quad (8.41)$$

где $Z_2 \approx R_2$

$$R_2 = R_{приб} + R_{пр} + R_{к} , \quad (8.42)$$

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:

$$R_{приб} = \frac{S_{приб}}{I_2^2} , \quad (8.43)$$

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

Значение максимально допустимого сопротивления проводов составит:

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

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

Определим минимально допустимое сечение медного провода:

$$s = \frac{\rho \cdot l_p}{R_{пр}} , \quad (8.44)$$

$$s = \frac{0.0175 \cdot 40}{0.86} = 0.814 \text{ мм}^2 .$$

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 ТОЛ-СЭЦ-10-1000/5 прошел необходимые проверки.

По такому же принципу выбираем трансформаторы тока для отходящих линий.

8.2.3 Выбор трансформатора напряжения

На стороне низкого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем трансформатор напряжения типа ЗНОЛ-СЭЦ-10.

Трансформатор напряжения выбирается и проверяется по:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (8.45)$$

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- по классу точности;

- по величине вторичной нагрузки:

$$S_{2\Sigma} \leq S_{ном}, \quad (8.46)$$

$$S_{2\Sigma} = \sqrt{(\sum S_{приб} \cos \phi)^2 + (\sum S_{приб} \sin \phi)^2} = \sqrt{P_{приб}^2 + Q_{приб}^2}. \quad (8.47)$$

К вторичной нагрузке трансформатора напряжения относятся счетчики активной и реактивной электрической энергии с общей активной мощностью 12,5 Вт и 4 вар.

$$13 \text{ ВА} \leq 75 \text{ ВА}.$$

Принятый к установке на стороне низкого напряжения на ГПП трансформатор напряжения типа ЗНОЛ-СЭЦ-10 прошел необходимые проверки.

8.2.4 Выбор жестких шин

Выбор жестких шин осуществляем по экономической плотности тока:

$$s = \frac{I_{\text{раб.ном}}}{j_{\text{э}}}; \quad (8.48)$$

$$s = \frac{550}{1} = 550 \text{ мм}^2.$$

Выбираем алюминиевые шины прямоугольного сечения с размерами 80x8 мм, с максимальным продолжительным током 1320 А.

Определим минимальное сечение шины по условию термической стойкости:

$$s_{\text{min}} = \frac{\sqrt{B_K} \cdot 10^3}{C_T}, \quad (8.49)$$

$$s_{\text{min}} = \frac{\sqrt{4.3} \cdot 10^3}{66} = 31.4 \text{ мм}^2.$$

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

$$F_{\text{max}}^3 = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{a} \cdot l \cdot i_{\text{уд}}^2 \cdot K_{\phi} \cdot K_p, \quad (8.50)$$

$$F_{\text{max}}^3 = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{1} \cdot 2.5 \cdot 13100^2 \cdot 1 \cdot 1 = 74.3 \text{ Н}.$$

Определим значение момента сопротивления поперечного сечения шины по формуле:

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6}, \quad (8.51)$$

$$W = \frac{0.008 \cdot 0.08^2}{6} = 8.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Найдем значение максимального напряжения в материале проводника:

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}^3 \cdot l}{\lambda \cdot W}, \quad (8.52)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{74.3 \cdot 2.5}{8 \cdot 8.5 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-6} = 2.7 \text{ МПа}.$$

Проверим на электродинамическую стойкость:

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{доп}}, \quad (8.53)$$

$$2.7 \text{ МПа} \leq 247.1 \text{ МПа},$$

где

$$\sigma_{\text{доп}} = 0.7 \cdot \sigma_p, \quad (8.54)$$

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

Найдем значение момента инерции поперечного сечения проводника по формуле:

$$J = \frac{b \cdot h^3}{12}, \quad (8.55)$$

$$J = \frac{0.008 \cdot 0.08^3}{12} = 3.4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4.$$

Найдем значение частоты собственных колебаний по формуле:

$$f_0 = \frac{r_1^2}{2 \cdot \pi \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m}}; \quad (8.56)$$

$$f_0 = \frac{3.14^2}{2 \cdot \pi \cdot 2.5^2} \cdot \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 3.4 \cdot 10^{-7}}{2.5}} = 24.6 \text{ Гц}.$$

При частоте собственных колебаний менее 30 Гц отсутствует механический резонанс.

8.2.5 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:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (8.57)$$

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- значению максимальной нагрузки на головку изолятора:

$$F_{\max} \leq F_{доп}, \quad (8.58)$$

$$74.3 \text{ Н} < 1607 \text{ Н},$$

где

$$F_{доп} = 0.6 \cdot F_{разруш} \cdot \frac{H_u}{H}, \quad (8.59)$$

$$F_{дон} = 0.6 \cdot 3750 \cdot \frac{0.12}{0.168} = 1607 \text{ Н.}$$

где

$$H = H_u + b + \frac{h}{2}, \quad (8.60)$$

$$H = 0.12 + 0.008 + \frac{0.08}{2} = 0.168.$$

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

8.2.6 Выбор проходных изоляторов

Выбираем проходные изоляторы типа ИП-10/1000-7,5 УХЛ2.

Проходные выбираются и проверяются по:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (8.61)$$

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- значению номинального тока:

$$I_{max} < I_n, \quad (8.62)$$

$$770 \text{ А} < 1000 \text{ А};$$

- значению максимальной нагрузки на головку изолятора:

$$F_{расч} \leq 0.6 \cdot F_{разр}, \quad (8.63)$$

$$21.5 \text{ Н} < 4500 \text{ Н},$$

где

$$F_{расч} = 0.5 \cdot \frac{i_{уд}^2}{a} \cdot l_{из} \cdot 10^{-7}, \quad (8.64)$$

$$F_{расч} = 0.5 \cdot \frac{13100^2}{1} \cdot 2.5 \cdot 10^{-7} = 21.5.$$

Принятые к установке на ГПП проходные изоляторы типа ИП-10/1000-7,5 УХЛ2 прошли необходимые проверки.

9 Расчет заземления ГПП

Для времени отключения тока короткого замыкания 0.04 с максимально допустимое напряжение прикосновения равно 500 В [21].

Определим значение напряжения на заземлителе по формуле:

$$U_3 = \frac{U_{np.дон}}{\kappa_{II}}, \quad (9.1)$$

$$U_3 = \frac{500}{0.219} = 2285 \text{ В},$$

где коэффициент напряжения прикосновения определяется как:

$$\kappa_{II} = \frac{M\beta}{\left(\frac{l_0 L_2}{a\sqrt{S}}\right)^{0.45}}, \quad (9.2)$$

$$\kappa_{II} = \frac{0.5 \cdot 0.94}{\left(\frac{5 \cdot 673}{10 \cdot \sqrt{3724}}\right)^{0.45}} = 0.219,$$

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

$$\beta = \frac{R_q}{R_q + 1.5\rho_{г.с}}, \quad (9.3)$$

$$\beta = \frac{1000}{1000 + 1.5 \cdot 40} = 0.94.$$

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

Сопrotивление заземляющего устройства должно удовлетворять условию:

$$R_3 < R_{3,доп}. \quad (9.4)$$

Определим число ячеек для расчетной модели заземлителя по формуле:

$$m = \frac{L_2}{2 \cdot \sqrt{S}} - 1, \quad (9.5)$$
$$m = \frac{673}{2 \cdot \sqrt{3724}} - 1 \approx 5.$$

Определим значение длины полос в расчетной модели по формуле:

$$L_2' = 2\sqrt{S}(m+1), \quad (9.6)$$
$$L_2' = 2\sqrt{3724} \cdot (5+1) = 732.3 \text{ м.}$$

Определим длину сторон ячейки по формуле:

$$b = \frac{\sqrt{S}}{m}, \quad (9.7)$$
$$b = \frac{\sqrt{3724}}{5} = 12.2 \text{ м.}$$

Определим число вертикальных заземлителей, которые необходимо установить по контуру:

$$n_6 = \frac{\sqrt{S} \cdot 4}{1 \cdot l_6}, \quad (9.8)$$

$$n_g = \frac{\sqrt{3724} \cdot 4}{1.5} \approx 49.$$

Определим общую протяженность вертикальных заземлителей:

$$L_g = l_g \cdot n_g, \quad (9.9)$$

$$L_g = 5 \cdot 49 = 245 \text{ м.}$$

Определим значение относительной глубины погружения вертикальных заземлителей по формуле:

$$\frac{l_B + t}{\sqrt{S}}, \quad (9.10)$$

$$\frac{5 + 0.7}{\sqrt{3724}} = 0.093.$$

Определим значение суммарного сопротивления для сложного заземлителя:

$$R_3 = A \frac{\rho_3}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_3}{L_2 + L_g}, \quad (9.11)$$

$$R_3 = 0.366 \cdot \frac{40}{\sqrt{3724}} + \frac{40}{673 + 245} = 0.28 \text{ Ом,}$$

где

$$A = \left(0.444 - 0.84 \frac{l_g + t}{\sqrt{S}} \right), \quad (9.12)$$

$$A = 0.444 - 0.84 \cdot 0.093 = 0.366;$$

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

Заключение

В бакалаврской работе были определены максимальные значения ожидаемых силовых нагрузок по каждому цеху предприятия по выпуску винтовых и поршневых компрессоров. Общая расчётная нагрузка предприятия составила 19472 кВА.

На примере ремонтно-механического цеха был произведен выбор силовых трансформаторов КТП и по минимуму приведенных затрат на основное оборудование КТП принята к установке двухтрансформаторная подстанция с силовыми трансформаторами ТМГ-160/10.

Определено необходимое числа и номинальная мощность силовых трансформаторов главной понизительной подстанции. По минимальным приведенным затратам выбран к установке на ГПП первый вариант с силовыми трансформаторами ТДН- 10000/110/10.

Выбраны схема ГПП и схема сети внутризаводского электроснабжения. Определены значения токов короткого замыкания и выбрано основное электрооборудование ГПП. Выполнен расчет заземления ГПП и определено необходимое число вертикальных заземлителей.

Список используемых источников

1. Ушаков В.Я., Чубик П.С. Потенциал энергосбережения и его реализация на предприятиях ТЭК: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политех. университета, 2015. 388 с.
2. Бартоломей П.А. Информационное обеспечение задач электроэнергетики: учебное пособие, 2-е изд., стер. М.: Флинта, Изд-во Урал. ун-та, 2017. 108 с.
3. 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: 05.03.2018).
4. Куско А., Томпсон М. Сети электроснабжения. Методы и средства обеспечения качества энергии. Саратов: Профобразование, 2017. 334 с.
5. Ушаков В.Я. Современные проблемы электроэнергетики [Электронный ресурс] : учебное пособие. Томск: Томский политехнический университет, 2014. 447 с. URL: <http://www.iprbookshop.ru/34715.html> (дата обращения: 02.03.2018).
6. Konovalov Y. V., Nurbosynov D. N. Optimization of power supply system reactive power compensation at the oil field electrical substation // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). St. Petersburg. 2017. pp. 1-5.
7. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю., Яшков В.А. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. М.: Форум, 2015. 368 с.
8. Щербаков Е.Ф., Александров Д.С., Дубов А.Л. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях: учебное пособие. М.: Форум, 2014. 496 с.
9. Banerjee G. K. Electrical and electronics engineering materials. - PHI Learning Pvt. Ltd., 2014. 360 p.
10. 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: 10.03.2018).

11. Ковалев И.Н. Электроэнергетические системы и сети : учебник. М. : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2015. 363 с.

12. Yang F., Gu C. Optimal design of power supply system for a novel permanent bistable electromagnetic clutch // 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Sydney. NSW. 2017. pp. 1-4.

13. Ополева Г. Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов : учеб. пособие. М. : ИД «ФОРУМ» : ИНФРА-М, 2018. 416 с.

14. Liu Z., Hu K. A Model-Based Diagnosis System for a Traction Power Supply System // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2017. vol. 13. no. 6. pp. 2834-2843.

15. Гальперин М.В. Электротехника и электроника : учебник, 2-е изд. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2017. 480 с.

16. Хорольский В.Я., Таранов М.А., Петров Д.В. Технико-экономические расчеты распределительных электрических цепей: учебное пособие. М.: Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2015. 96 с.

17. Алиев И.И. Электротехника и электрооборудование : учебное пособие для вузов. Саратов: Вузовское образование, 2014. 1199 с.

18. Wang C. M., Lu C. M., Cheng C. H. A high performance DC power supply system // 2017 International Conference on Applied System Innovation (ICASI). Sapporo. 2017. pp. 1442-1445.

19. Пилипенко В.Т. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах : учебно-методическое пособие. Оренбург: Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2014. 124 с.

20. Щербаков Е. Ф., Александров Д. С. Электрические аппараты: учебник. - М.: Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2015. 304 с.

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