

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 производства станков лазерного раскроя металла
ЗАО «АЛРТ»

Студент

А.А. Биктимиркин

(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 производства станков лазерного раскроя металла ЗАО «АЛРТ».

В ходе выполнения работы было произведено решение следующих вопросов: дана краткая характеристика объекта проектирования, выполнен расчет ожидаемых максимальных нагрузок по отдельным цехам и по предприятию в целом; выбраны мощность и количество силовых трансформаторов в цеховых трансформаторных подстанциях и на главной понизительной подстанции; определены значения токов короткого замыкания; выполнены выбор и проверка основного электрооборудования на главной понизительной подстанции; произведен расчет защитного заземления ГПП.

Бакалаврская работа содержит 56 листов машинописного текста. В объем работы входит 4 таблицы и 3 рисунка. Графическая часть работы выполнена на листах формата А1 и состоит из шести чертежей.

Содержание

Введение	4
1 Характеристика объекта проектирования	6
2 Расчет ожидаемых максимальных нагрузок по цехам	7
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	29
6 Выбор схемы сети внутризаводского электроснабжения	30
7 Определение значений токов короткого замыкания	31
8 Выбор и проверка основного электрооборудования на главной понизительной подстанции	35
9 Расчет заземления ГПП	50
Заключение	53
Список используемых источников	54

Введение

В настоящее время происходит постоянное развитие систем электроснабжения промышленных предприятий, усиливаются требования к надежности электроснабжения потребителей и повышению экономичности, широко внедряются автоматизированные системы учета и управления передачей и потребления энергоресурсов [1, 2].

Выбор новых видов техники и используемых технологий в процессе проектирования электроснабжения требует учета уже накопленного опыта в зарубежных странах, определения возможностей отечественных производителей и строительных организаций. Стратегией развития ЕНЭС на период до 2020 г. намечен к внедрению ряд прогрессивных электросетевых технологий, таких как: гибкие системы передачи электрической энергии (FACTS); УШР с микропроцессорными системами управления; использование эффектов сверхпроводимости; применение накопителей электроэнергии; внедрение автоматизированных подстанций с системой дистанционного управления высоковольтными выключателями; использование силовых трансформаторов с повышенной устойчивостью к токам коротких замыканий; внедрение оборудования с элегазовой изоляцией и др [3-5].

При проектировании электроснабжения сказывается влияние многих факторов друг на друга: выбор силовых трансформаторов и устройств компенсации реактивной мощности оказывает влияние на качество электрической энергии, обеспечение надежности и показатели экономичности работы электрических подстанций, что приводит к необходимости выбора оптимального или близкого к нему варианта системы электроснабжения.

Правильно выполненные расчеты позволяют выбрать оптимальные параметры электрических сетей предприятия, обеспечить возможность их дальнейшего развития при соблюдении баланса надежности и экономичности [6, 7].

Целью работы является разработка надежной и экономичной системы электроснабжения производства станков лазерного раскроя металла ЗАО «АЛРТ».

В задачи бакалаврской работы входили: расчет ожидаемых максимальных нагрузок по отдельным цехам и по предприятию в целом; выбор мощности и количества силовых трансформаторов в цеховых трансформаторных подстанциях и на главной понизительной подстанции; определение значений токов короткого замыкания; выбор и проверка основного электрооборудования на главной понизительной подстанции; расчет защитного заземления ГПП.

1 Характеристика объекта проектирования

ЗАО «АЛРТ» было основано в 1996 году. Уже в 2002 году предприятие начало заниматься разработкой станков лазерного раскроя металлов. Серийное производство и поставки оборудования начались в 2006 году. Помимо производства станков лазерного раскроя металла компания оказывает широкий спектр услуг по металлообработке:

- лазерная резка металла;
- высокоточная механообработка металла;
- гибка листового металла;
- сварка всех видов металлов;
- слесарно-сборочные работы.

Имея полный цикл металлообработки от лазерной резки до сборки уже готовых, покрашенных изделий предприятие может осуществлять производство деталей корпусных изделий под заказ по чертежам заказчика, а так же деталей различной сложности.

Производственные участки оснащены самым современным оборудованием, располагают квалифицированными и опытными специалистами, используют проверенные и надежные технологии изготовления деталей. Это позволяет предприятию предлагать продукцию высокого качества, представленную в широком ассортименте, по гибкой системе цен.

Отличительной чертой предприятия является индивидуальный подход к каждому заказчику, профессиональное выполнение заказа в оговоренные сроки, использование передовых технологий в производстве и контроль качества.

2 Расчет ожидаемых максимальных нагрузок по цехам

К основным методам расчета относят методы определения нагрузки по: установленной мощности электроприемников и значению коэффициента спроса, который определяется по справочникам; средней мощности и значению коэффициента формы графика нагрузки; средней активной мощности и значению коэффициента максимума (расчетному коэффициенту). К вспомогательным методам расчета относят методы определения нагрузки по: удельному расходу электрической энергии на выпуск единицы готовой продукции при известном объеме производства продукции за промежуток времени; удельной нагрузке, приходящейся на единицу площади помещения или приходящейся на одного человека.

Выбор к использованию определенного метода расчета электрических нагрузок определяется предъявляемыми требованиями к точности результатов расчетов и полнотой исходной информации [8-10].

Расчет ожидаемых электрических нагрузок выполняем в следующей последовательности:

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 [11]:

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

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_{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	12	1.00	12	0.2	0.65	1.17	2.4	2.81	1.75	4.20	2.81	5.05
2	530	106.00	5	0.8	0.8	0.75	424	318.00	1.26	534.24	318.00	621.72
3	43	8.60	5	0.27	0.65	1.17	11.61	13.57	2	23.22	13.57	26.90
4	246	35.14	7	0.45	0.75	0.88	110.7	97.63	1.51	167.16	107.39	198.68
5	760	15.20	50	0.3	0.65	1.17	228	266.56	1.16	264.48	266.56	375.51
6	80	16.00	5	0.65	0.55	1.52	52	78.96	1.33	69.16	86.86	111.03
7	225	56.25	4	0.6	0.75	0.88	135	119.06	1.46	197.10	130.96	236.64
8	1615	11.96	135	0.2	0.55	1.52	323	490.47	1.11	358.53	539.52	647.78

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	340	17.89	19	0.7	0.85	0.62	238	147.50	1.11	264.18	162.25	310.03
10	475	16.38	29	0.35	0.55	1.52	166.25	252.45	1.22	202.83	277.69	343.88
11	90	9.00	10	0.55	0.75	0.88	49.5	43.65	1.3	64.35	48.02	80.29
12	360	13.33	27	0.6	0.78	0.80	216	173.29	1.14	246.24	190.62	311.40
13	430	15.36	28	0.4	0.65	1.17	172	201.09	1.19	204.68	221.20	301.37
14	260	37.14	7	0.4	0.7	1.02	104	106.10	1.58	164.32	116.71	201.55
15	258	25.80	10	0.7	0.55	1.52	180.6	274.24	1.16	209.50	301.66	367.27
16	95	19.00	5	0.1	0.6	1.33	9.5	12.67	1.76	16.72	13.93	21.76

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	5819	1...106	358	0.42	-	1.07	2422.6	2598.05	-	2990.90	2797.76	4095.48
2	1890	630	3	0.75	0.92	-0.43	1417.5	-603.85	1.05	1488.38	-603.85	1606.21
9	2500	1250	2	0.75	0.92	-0.43	1875	-798.75	1.05	1968.75	-798.75	2124.61
Итого по 6 кВ	4390	630...1250	5	0.75	-	-0.43	3292.5	-1402.60	-	3457.13	-1402.60	3730.82
Всего по предприятию	10209	1...1250	363	0.56	-	0.21	5715.1	1195.45	-	6448.02	1395.16	6597.23

3 Определение необходимого числа и номинальной мощности силовых трансформаторов цеховых КТП

3.1 Выбор трансформаторов КТП на примере цеха РМЦ

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

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

$$S_{HT} > \frac{202.8}{0.7 \cdot 2} = 277.7 \text{ кВА}.$$

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: $\Delta P_{XX} = 0.42 \text{ кВт}$, $\Delta P_{K3} = 2.53 \text{ кВт}$, $i_{XX} = 2.1\%$, $u_{K3} = 4.5\%$, $K_T = 111.75 \text{ тыс. руб.}$.

Произведем расчет потерь в трансформаторе:

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

$$\Delta P_{mp} = 2 \cdot 0.42 + 0.7^2 \cdot 2.53 = 3.32 \text{ кВт},$$

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

$$\Delta Q_{mp} = 2 \cdot 2.35 + 0.7^2 \cdot 4.4 \cdot \frac{160}{100} = 14.42 \text{ квар.}$$

Найдем расчётную нагрузку цеха с учётом потерь активной и реактивной мощности в силовом трансформаторе [13]:

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

$$P_p = 202.8 + 3.32 = 206.1 \text{ кВт},$$

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

$$Q_p = 277.7 + 14.42 = 292.1 \text{ квар}.$$

Рассчитаем реактивную мощность в период минимальных нагрузок:

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

$$Q_{\min} = 0.5 \cdot 292.1 = 146.1 \text{ квар}.$$

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

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

$$Q'_{\text{э1}} = 292.1 - 0.7 \cdot 0 = 292.1 \text{ квар},$$

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

$$Q''_{\text{э1}} = 0.28 \cdot 206.1 = 57.7 \text{ квар}.$$

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

Принимаем наименьшее значение $Q_{\text{э1}} = 57.7 \text{ квар}$.

Определим экономически целесообразные значения реактивной мощности в часы минимальных нагрузок:

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

$$Q_{\text{э2,в}} = 146.1 - 292.1 + 57.7 = -88.3 \text{ квар};$$

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

$$Q_{\text{э2,н}} = 146.1 + 0 = 146.1 \text{ квар};$$

где $Q_k = 0$.

Из-за повышенного уровня напряжения в период минимального потребления мощности принимаем наибольшее значение: $Q_{\varepsilon 2} = 146.1 \text{ квар}$.

Определяем суммарное значение мощности конденсаторных установок:

$$\begin{aligned} Q_{\text{ку max}} &= 1,15 \cdot Q_p - Q_{\varepsilon 1}, \\ Q_{\text{ку max}} &= 1,15 \cdot 292.1 - 57.7 = 278.2 \text{ квар}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Из них мощность нерегулируемых КУ составит:

$$\begin{aligned} Q_{\text{ку min}} &= Q_{\text{min}} - Q_{\varepsilon 2}, \\ Q_{\text{ку min}} &= 146.1 - 146.1 = 0. \end{aligned} \quad (3.12)$$

То есть все КУ должны регулироваться.

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

$$\begin{aligned} Q_{\varepsilon H} &= Q_{\varepsilon 1} - (Q_p - Q_{p\Sigma}), \\ Q_{\varepsilon H} &= 57.7 - 292.1 - 277.7 = 43.3 \text{ квар}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

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

$$\begin{aligned} Q_T &= \sqrt{(N_T K_3 S_H)^2 - P_{p\Sigma}^2}, \\ Q_T &= \sqrt{(2 \cdot 0.7 \cdot 160)^2 - 202.8^2} = 95.1 \text{ квар}, \end{aligned} \quad (3.14)$$

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

$$Q_{KYH} = 277.7 - 95.1 = 182.6 \text{ квар} ,$$

$$Q_{KYB} = Q_{KV \max} - Q_{KYH} , \quad (3.16)$$

$$Q_{KYB} = 278.2 - 182.6 = 95.6 < 800 \text{ квар} .$$

Так как $Q_{KYB} < 800$ квар , то размещение высоковольтных КУ нецелесообразно.

Принимаем к установке цеховую КТП с двумя силовыми трансформаторами ТМГ-160/10 и 2 конденсаторными установками АУКРМ 0,4 кВ мощностью по 90 квар.

Определим продолжительность периода максимальных потерь

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

$$\tau = \left(0,124 + \frac{5164}{10000} \right)^2 \cdot 8760 = 3592.6 \text{ ч.}$$

Определим удельную стоимость потерь на холостом ходу в силовом трансформаторе:

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

$$C_{XX} = \left(\frac{596.57 \cdot 12}{5164} + 1.389 \right) \cdot 8760 = 24.312 \text{ тыс.руб/кВт} .$$

Определим удельную стоимость потерь короткого замыкания в силовом трансформаторе:

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

$$C_{K3} = \left(\frac{596.57 \cdot 12}{5164} + 1.389 \right) \cdot 3592.6 = 9.97 \text{ тыс.руб/кВт} .$$

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

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

$$C \cdot \Delta P_T = 24.312 \cdot 0.42 + 9.97 \cdot 0.7^2 \cdot 2.53 = 22.571 \text{ тыс.руб.}$$

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

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

$$Z_{КТП} = 0.223 \cdot ((111.75 \cdot 2) + (42.1 \cdot 2)) + (22.571 \cdot 2) = 113.76 \text{ тыс.руб.}$$

3.1.2 Вариант с силовым трансформатором ТМГ-250

По данным производителя силового трансформатора определяем его паспортные данные: $\Delta P_{XX} = 0.52 \text{ кВт}$, $\Delta P_{K3} = 3.05 \text{ кВт}$, $i_{XX} = 2.25 \%$, $u_{K3} = 4.45 \%$, $K_T = 161.25 \text{ тыс.руб.}$

Произведем расчет потерь в трансформаторе:

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

$$\Delta P_{mp} = 2 \cdot 0.52 + 0.7^2 \cdot 3.05 = 4.03 \text{ кВт},$$

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

$$\Delta Q_{mp} = 2 \cdot 2.25 + 0.7^2 \cdot 4.45 \cdot \frac{250}{100} = 22.15 \text{ квар.}$$

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

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

$$P_p = 202.8 + 4.03 = 206.9 \text{ кВт},$$

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

$$Q_p = 277.7 + 22.15 = 299.9 \text{ квар}.$$

Рассчитаем реактивную мощность в период минимальных нагрузок:

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

$$Q_{\min} = 0.5 \cdot 299.9 = 149.9 \text{ квар}.$$

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

$$Q'_{\text{э1}} = Q_p - 0.7 Q_{\text{сд}}, \quad (3.27)$$

$$Q'_{\text{э1}} = 299.9 - 0.7 \cdot 0 = 299.9 \text{ квар},$$

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

$$Q''_{\text{э1}} = 0.28 \cdot 206.9 = 57.9 \text{ квар}.$$

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

Принимаем наименьшее значение $Q_{\text{э1}} = 57.9 \text{ квар}$.

Определим экономически целесообразные значения реактивной мощности в часы минимальных нагрузок:

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

$$Q_{\text{э2,в}} = 149.9 - 299.9 - 57.9 = -92 \text{ квар};$$

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

$$Q_{\text{э2,н}} = 149.9 + 0 = 149.9 \text{ квар};$$

где $Q_k = 0$.

Из-за повышенного уровня напряжения в период минимального потребления мощности принимаем наибольшее значение: $Q_{\varphi 2} = 149.9$ квар.

Определяем суммарное значение мощности конденсаторных установок:

$$Q_{\text{ку max}} = 1,15 \cdot Q_p - Q_{\varphi 1}, \quad (3.31)$$
$$Q_{\text{ку max}} = 1,15 \cdot 299.9 - 57.9 = 286.9 \text{ квар.}$$

Из них мощность нерегулируемых КУ составит:

$$Q_{\text{ку min}} = Q_{\text{min}} - Q_{\varphi 2}, \quad (3.32)$$
$$Q_{\text{ку min}} = 149.9 - 149.9 = 0.$$

То есть все КУ должны регулироваться.

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

$$Q_{\varphi H} = Q_{\varphi 1} - (Q_p - Q_{p\Sigma}), \quad (3.33)$$
$$Q_{\varphi H} = 57.9 - 299.9 - 277.7 = 35.8 \text{ квар.}$$

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

$$Q_T = \sqrt{(N_T K_3 S_H)^2 - P_{p\Sigma}^2}, \quad (3.34)$$
$$Q_T = \sqrt{(2 \cdot 0.7 \cdot 250)^2 - 202.8^2} = 285.2 \text{ квар,}$$

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

$$\begin{aligned}
Q_{KYH} &= 277.7 - 285.2 = -7.5 \text{ квар} , \\
Q_{KYB} &= Q_{KY \max} - Q_{KYH} , \\
Q_{KYB} &= 286.9 + 7.5 = 294.4 < 800 \text{ квар} .
\end{aligned}
\tag{3.36}$$

Так как $Q_{KYH} < 50$ квар и $Q_{KYB} < 800$ 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:

$$\begin{aligned}
C \cdot \Delta P_T &= C_{XX} \cdot \Delta P_{XX} + C_{K3} \cdot K_3^2 \cdot \Delta P_{K3} , \\
C \cdot \Delta P_T &= 24.312 \cdot 0.52 + 9.97 \cdot 0.7^2 \cdot 3.05 = 27.543 \text{ тыс.руб.}
\end{aligned}
\tag{3.37}$$

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

$$\begin{aligned}
З_{КТП} &= E \cdot (K_T \cdot N_T + K_{KY} \cdot N_{KY}) + C \cdot \Delta P \cdot N_T , \\
З_{КТП} &= 0.223 \cdot ((161.25 \cdot 2) + (0 \cdot 2)) + (27.543 \cdot 2) = 127 \text{ тыс.руб.}
\end{aligned}
\tag{3.38}$$

По минимуму приведенных затрат на основное оборудование КТП принимаем к установке 2х трансформаторную подстанцию с силовыми трансформаторами ТМГ-160/10 и 2 конденсаторными установками АУКРМ 0,4 кВ мощностью по 90 квар.

Для остальных цехов предприятия выбор трансформаторов КТП производим аналогичным образом.

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

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, однострансформаторные 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. [9, 14].

Величину рационального напряжения питания предприятия можно определить по формуле:

$$U_{РАЦ} = 4.34 \cdot \sqrt{L + 0.016 \cdot P_{PI}}, \quad (4.1)$$
$$U_{РАЦ} = 4.34 \cdot \sqrt{16 + 0.016 \cdot 6448} = 47 \text{ кВ},$$

где расчетная активная нагрузка предприятия определяется:

$$P_{PI} = P_{PH} + P_{PB} + P_{STOP}, \quad (4.2)$$
$$P_{PI} = 2990.9 + 3457.1 + 0 = 6448 \text{ кВт}.$$

Полную расчетную нагрузку предприятия определим по формуле:

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

$$S_{PII} = \sqrt{6448^2 + 1483^2} = 6616 \text{ кВА},$$

где величину расчетной реактивной нагрузки предприятия найдем по формуле:

$$Q_{\Sigma C} = P_{PII} \cdot \operatorname{tg} \phi, \quad (4.4)$$

$$Q_{\Sigma Ci} = 6448 \cdot 0.23 = 1483 \text{ квар.}$$

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.

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

$$S_{номт} \approx 0,8 \cdot 6616 \cdot \frac{1}{1,4} = 3781 \text{ кВА.}$$

По шкале номинальных мощностей силовых трансформаторов и каталогу производителя выбираем для дальнейшего рассмотрения два варианта: трансформаторы ТМН-4000/35/6 и следующий по шкале номинальных мощностей ТМН-6300/35/6.

4.1 Вариант установки на ГПП предприятия двух силовых трансформаторов ТМН - 4000/35/6

По сайту производителя силового трансформатора определяем его паспортные данные: $\Delta P_{XX} = 5.4 \text{ кВт}$, $\Delta P_{K3} = 33.2 \text{ кВт}$, $i_{XX} = 0.85 \%$, $u_{K3} = 7.4 \%$, $K_T = 8862 \text{ тыс. руб.}$

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

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

$$\Delta P_x' = 5.4 + 0,05 \cdot 34 = 7.1 \text{ кВт},$$

где

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

$$\Delta Q_x = 0.85 + 4000 / 100 = 34 \text{ квар},$$

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

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

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

$$\Delta Q_\kappa = 7.4 \cdot 4000 / 100 = 296 \text{ квар},$$

$$\Delta P_\kappa' = \Delta P_\kappa + K_{un} \cdot \Delta Q_\kappa, \quad (4.9)$$

$$\Delta P_\kappa' = 33.2 + 0.05 \cdot 296 = 48 \text{ кВт}.$$

Значение коэффициента загрузки трансформатора найдем по формуле:

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

$$K_z = \frac{6646}{4000} = 1.662.$$

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

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

$$P_m = 7.1 + 1.662^2 \cdot 48 = 139.61 \text{ кВт.}$$

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

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

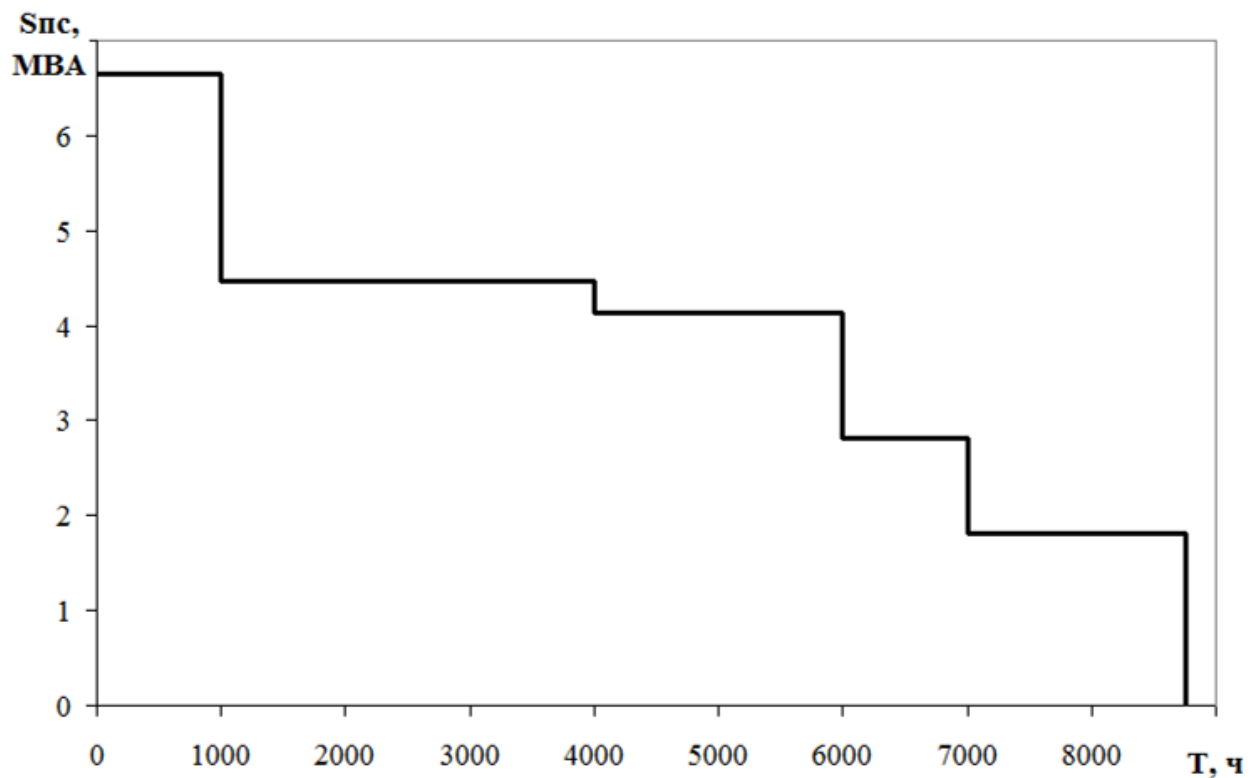


Рисунок 4.1 – Суммарный годовой график нагрузки подстанции предприятия

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	$K_{зBi}$	$\Delta W_{\kappa Bi}$, $\kappa Bm \cdot ч$	ΔW_{xi} , $\kappa Bm \cdot ч$
1	6.646	1000	1.662	66254	14200
2	4.469	3000	1.117	89867	42600
3	4.136	2000	1.034	51329	28400
4	2.807	1000	0.702	11822	14200
5	1.810	1760	0.453	8652	24992
$\Sigma \Delta W_{\kappa Bi} = 227923$ $\Sigma \Delta W_{xi} = 124392$					

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

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

$$I_{\Delta W_{ПТС}} = (227923 + 124392) \cdot 2.775 = 978 \text{ тыс. руб.}$$

где $C_{\vartheta} = 2.775 \text{ руб} / \kappa Bm \cdot ч$ - стоимость 1 кВт·ч потерь электрической энергии.

Определим значение суммарных приведенных затрат на ГПП по формуле:

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

$$З_{прив} = 0.25 \cdot 17724.58 + 1666 + 978 = 7075 \text{ тыс. руб.}$$

где $K = 2 \cdot 8862.29 = 17724.58 \text{ тыс. руб.}$ – цена за два силовых трансформатора ТМН-4000/35;

$$I_{\vartheta} = P_{\text{сум}} \cdot K = 0,094 \cdot 17724.58 = 1666 \text{ тыс. руб.} - \text{годовые отчисления.}$$

4.2 Вариант установки на ГПП предприятия двух силовых трансформаторов ТМН - 6300/35/6

По сайту производителя силового трансформатора определяем его паспортные данные: $\Delta P_{xx} = 7.5 \text{ кВт}$, $\Delta P_{кз} = 45 \text{ кВт}$, $i_{xx} = 0.75 \%$, $u_{кз} = 7.3 \%$, $K_T = 10423 \text{ тыс. руб.}$

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

$$\Delta P_x' = \Delta P_x + K_{un} \cdot \Delta Q_x, \quad (4.15)$$
$$\Delta P_x' = 7.5 + 0.05 \cdot 47.3 = 9.86 \text{ кВт},$$

где

$$\Delta Q_x = I_{xx\%} + S_{ном.м} / 100, \quad (4.16)$$
$$\Delta Q_x = 0.75 + 6300 / 100 = 47.3 \text{ квар},$$
$$K_{un} = 0.05 \text{ кВт} / \text{квар}.$$

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

$$\Delta Q_{\kappa} = u_{\kappa\%} \cdot S_{ном.м} / 100, \quad (4.17)$$
$$\Delta Q_{\kappa} = 7.3 \cdot 6300 / 100 = 459.9 \text{ квар},$$
$$\Delta P_{\kappa}' = \Delta P_{\kappa} + K_{un} \cdot \Delta Q_{\kappa}, \quad (4.18)$$
$$\Delta P_{\kappa}' = 45 + 0.05 \cdot 459.9 = 68 \text{ кВт}.$$

Значение коэффициента загрузки трансформатора найдем по формуле:

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

$$K_3 = \frac{6646}{6300} = 1.055.$$

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

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

$$P_m = 9.86 + 1.055^2 \cdot 68 = 85.53 \text{ кВт}.$$

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

$$\Delta W = \sum n_i \cdot \Delta P'_x \cdot T_i + \sum \frac{1}{n_i} \cdot K_{36}^2 \cdot \Delta P'_k \cdot T_i = \Delta W_x + \Delta W_k \quad (4.21)$$

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	$T_i, \text{ ч}$	K_{3Bi}	$\Delta W_{\kappa Bi},$ $\text{кВт} \cdot \text{ч}$	$\Delta W_{xi},$ $\text{кВт} \cdot \text{ч}$
1	6,646	1000	1,055	37834	19725
2	4,469	3000	0,709	51319	59175
3	4,136	2000	0,657	29311	39450
4	2,807	1000	0,446	6751	19725
5	1,810	1760	0,287	4941	34716
$\Sigma \Delta W_{\kappa Bi} = 130156$			$\Sigma \Delta W_{xi} = 172791$		

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

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

$$I_{\Delta W_{ПТС}} = (130156 + 172791) \cdot 2.775 = 841 \text{ тыс. руб.}$$

где $C_{\vartheta} = 2.775 \text{ руб} / \text{кВт} \cdot \text{ч}$ - стоимость 1 кВт·ч потерь электрической энергии.

Определим значение суммарных приведенных затрат на ГПП по формуле:

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

$$Z_{\text{прив}} = 0.25 \cdot 20846.67 + 1960 + 841 = 8012 \text{ тыс. руб.}$$

где $K = 2 \cdot 10423.33 = 20846.67 \text{ тыс. руб.}$ – цена за два силовых трансформатора ТМН-6300/35;

$$I_{\vartheta} = P_{\text{сум}} \cdot K = 0,094 \cdot 20846.67 = 1960 \text{ тыс. руб.} - \text{годовые отчисления.}$$

По минимальным приведенным затратам выбираем к установке на ГПП первый вариант с силовыми трансформаторами ТМН- 4000/35/6.

5 Выбор схемы ГПП

Выбор схемы и компоновки главной понизительной подстанции должны быть направлены на уменьшение площади подстанции [9].

Для РУ 35 кВ возможно открытое или закрытое исполнение. Рекомендуется открытое исполнение с применением жесткой ошиновки блочной заводской комплектации. Для РУ 35 кВ закрытого исполнения в настоящее время выпускаются КРУ 35 кВ отечественных и зарубежных производителей следующих серий: КО-35-АЭ производства НПФ «Альянс-Электро»; UniGear ZSI концерна АББ; КУ35 ЗАО «Высоковольтный союз»; К-65 Самарского завода «Электрощит» и др [15].

В распределительных устройствах 35 кВ вновь возводимых подстанций запрещены:

- схемы подстанций с высшим номинальным напряжением 35 кВ с отделителями и короткозамыкателями или предохранителями;
- схемы подстанций с высшим номинальным напряжением 35 кВ с беспортальным приемом воздушных линий.

Схемы распределительных устройств с напряжением 6 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 35 кВ рекомендуется применять элегазовые или вакуумные выключатели; антиферрорезонансные ТН.

В РУ 6 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 [9].

6 Выбор схемы сети внутризаводского электроснабжения

Распределение электроэнергии может осуществляться по радиальной, магистральной или смешанной схемам. При выборе определенной схемы должны учитываться конструктивное выполнение сетей, выбранные способы передачи электрической энергии внутри объекта, необходимо учитывать также значение токов КЗ [16].

Радиальные схемы применяют при расположении нагрузок обособленно друг от друга по площади предприятия и в разных направлениях от ГПП. Радиальные схемы обычно применяют двухступенчатыми: 1-я ступень - РУ 6-10 кВ; 2-я ступень - КТП.

Магистральные схемы применяются в распределительных сетях 6-10 кВ тогда, когда потребителей электроэнергии достаточно много и радиальные схемы становятся нецелесообразными из-за наличия множества звеньев коммутации. Число цеховых трансформаторов запитанных от одной магистрали, зависит от их номинальной мощности и требований по надежности электроснабжения электроприемников. Как правило, магистральные схемы применяются для запитки от одной магистральной линии до 5-6 трансформаторных подстанций с общей установленной мощностью силовых трансформаторов не более 5-6 МВА.

На промышленных и непромышленных объектах достаточно редко встречаются чисто радиальные или магистральные схемы. 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 [17].

7 Определение значений токов короткого замыкания

Для определения значений токов короткого замыкания составляем две схемы: расчетную, которая изображена на рисунке 7.1, и схему замещения, которая изображена на рисунке 7.2.

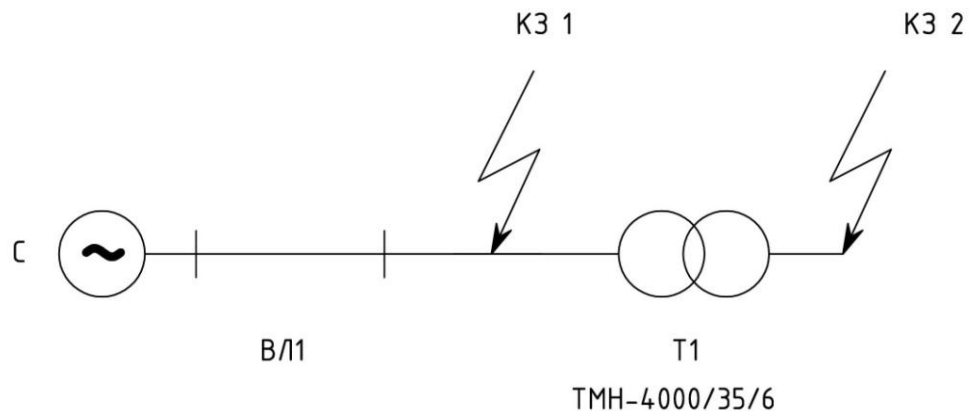


Рисунок 7.1 – Расчетная схема

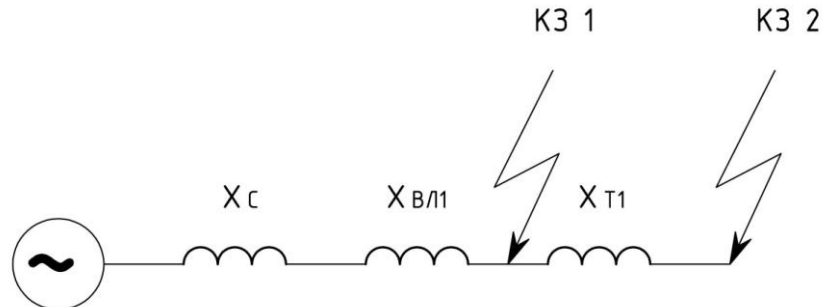


Рисунок 7.2 – Схема замещения

Параметры, необходимые для определения значений токов КЗ [18, 19]:

Параметры внешней ЭЭС: $U_{cp} = 37$ кВ; $S_{\sigma} = 1000$ МВА; $S_{\kappa} = 1150$ МВА.

Параметры питающей воздушной линии электропередачи:
 $x_{yo} = 0,4$ Ом/км; $L = 16$ км.

Параметры выбранного к установке на ГПП силового трансформатора:
 $S_n = 4$ МВА; $U_{\kappa} = 7,4$ %.

Определим сопротивление системы по формуле:

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

$$x_{c.\bar{o}} = \frac{1000}{1150} = 0.87.$$

Определим сопротивление воздушной линии электропередачи по формуле:

$$x_{BЛ.\bar{o}} = \frac{x_{y\partial}}{2} \cdot L \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{сн}^2}; \quad (7.2)$$

$$x_{BЛ.\bar{o}} = \frac{0.4}{2} \cdot 16 \cdot \frac{1000}{37^2} = 2.337.$$

Определим сопротивление принятого к установке на ГПП силового трансформатора ТМН-4000/35/6 по формуле:

$$x_{T.\bar{o}} = \frac{U_{\kappa}, \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_{н}}; \quad (7.3)$$

$$x_{T.\bar{o}} = \frac{7.4}{100} \cdot \frac{1000}{4} = 18.5.$$

7.1 Расчет для точки К1

Определим суммарное сопротивление цепи:

$$x_{рез1} = x_{c.\bar{o}} + x_{BЛ.\bar{o}}; \quad (7.4)$$

$$x_{рез1} = 0.87 + 2.337 = 3.207.$$

Найдем значение базисного тока:

$$I_{\sigma.k1} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{ch}}; \quad (7.5)$$

$$I_{\sigma.k1} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 37} = 15.604 \text{ кА};$$

Определим начальное действующее значение трехфазного тока короткого замыкания по формуле:

$$I_{k1} = \frac{E_{\sigma}}{x_{рез1}} \cdot I_{\sigma}; \quad (7.6)$$

$$I_{k1}^3 = \frac{1}{3.207} \cdot 15.604 = 4.866 \text{ кА};$$

Определим значение ударного тока КЗ:

$$i_{y\sigma.k1} = \sqrt{2} \cdot I_{n,o}^3 \cdot \kappa_{y\sigma}; \quad (7.7)$$

$$i_{y\sigma.k1} = \sqrt{2} \cdot 4.866 \cdot 1.8 = 12.386 \text{ кА}.$$

7.2 Расчет для точки К2

Определим суммарное сопротивление цепи:

$$x_{рез2} = x_{рез1} + x_{T.\sigma}; \quad (7.8)$$

$$x_{рез2} = 3.207 + 18.5 = 21.707.$$

Найдем значение базисного тока:

$$I_{\sigma.k2} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{ch}}; \quad (7.9)$$

$$I_{\sigma.\kappa 2} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6.3} = 91.643 \text{ кА};$$

Определим начальное действующее значение трехфазного тока короткого замыкания по формуле:

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

$$I_{\kappa 2}^3 = \frac{1}{21.707} \cdot 91.643 = 4.222 \text{ кА};$$

Определим значение ударного тока КЗ:

$$i_{\text{уд.}\kappa 2} = \sqrt{2} \cdot I_{n,o}^3 \cdot \kappa_{\text{уд}}; \quad (7.11)$$

$$i_{\text{уд.}\kappa 2} = \sqrt{2} \cdot 4.222 \cdot 1.85 = 11.045 \text{ кА}.$$

Результаты определения значений токов короткого замыкания заносим в таблицу 7.1.

Таблица 7.1 – Результаты определения значений токов короткого замыкания

№ точки КЗ	$U_{\text{сн}}, \text{кВ}$	$\kappa_{\text{уд}}$	$I_{\kappa}^{\text{сн}}, \text{кА}$	$i_{\text{уд}}, \text{кА}$
1	37	1,8	4,9	12,4
2	6,3	1,85	4,2	11,0

8 Выбор и проверка основного электрооборудования на главной понизительной подстанции

8.1 Выбор высоковольтного выключателя

На стороне высокого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем высоковольтный выключатель (ВВ) типа ВВН-СЭЩ-35.

ВВ выбираем и проверяем по следующим условиям [20]:

- уровню номинального напряжения:

$$\begin{aligned} U_{сети} &\leq U_n, \\ 35 \text{ кВ} &\leq 35 \text{ кВ}; \end{aligned} \quad (8.1)$$

- значению номинального тока:

$$\begin{aligned} I_{max} &< I_n, \\ 87 \text{ А} &< 1000 \text{ А}, \end{aligned} \quad (8.2)$$

где

$$\begin{aligned} I_{max} &= 1.4 \cdot \frac{S_{н.Т}}{\sqrt{3} \cdot U_{сн}}, \\ I_{max} &= 1.4 \cdot \frac{4000}{\sqrt{3} \cdot 37} = 87 \text{ А}; \end{aligned} \quad (8.3)$$

- коммутационной способности:

$$\begin{aligned} I_{к1} &\leq I_{откл.н}, \\ 4.9 \text{ кА} &\leq 25 \text{ кА}, \end{aligned} \quad (8.4)$$

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

$$2.5 \text{ кА} \leq 12.4 \text{ кА},$$

где

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

$$i_{a.\tau} = \sqrt{2} \cdot 4.9 \cdot e^{\frac{-0.05}{0.05}} = 2.5 \text{ кА},$$

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

$$i_{a.n.} = \left(\sqrt{2} \cdot \frac{35}{100} \right) \cdot 25 = 12.4 \text{ кА},$$

- электродинамической стойкости:

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

$$4.9 \text{ кА} \leq 25 \text{ кА};$$

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

$$12.4 \text{ кА} \leq 63 \text{ кА};$$

- термической стойкости:

$$B_{\kappa} \leq I_{np.c}^2 \cdot t_{np.c}, \quad (8.10)$$

$$3.6 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 62.5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

Принятый к установке на стороне высокого напряжения на ГПП высоковольтный выключатель типа ВВН-СЭЩ-35 прошел необходимые проверки.

На стороне низкого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем ВВ типа ВВУ-СЭЩ-П9-6.

ВВ выбираем и проверяем по следующим условиям:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (8.11)$$

$$6 \text{ кВ} \leq 6 \text{ кВ};$$

- значению номинального тока:

$$I_{max} < I_n, \quad (8.12)$$

$$513.2 \text{ А} < 1000 \text{ А},$$

где

$$I_{max} = 1.4 \cdot \frac{S_{н.Т}}{\sqrt{3} \cdot U_{сн}}, \quad (8.13)$$

$$I_{max} = 1.4 \cdot \frac{4000}{\sqrt{3} \cdot 6.3} = 513.2 \text{ А};$$

- коммутационной способности:

$$I_{\kappa 1} \leq I_{откл.н}, \quad (8.14)$$

$$4.22 \text{ кА} \leq 20 \text{ кА},$$

$$i_{a,\tau} \leq i_{a.н}, \quad (8.15)$$

$$3 \text{ кА} \leq 8.5 \text{ кА},$$

где

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{\kappa 1} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}}, \quad (8.16)$$

$$i_{a.\tau} = \sqrt{2} \cdot 4.22 \cdot e^{\frac{-0.04}{0.06}} = 3 \text{ кА},$$

$$i_{a.H.} = \sqrt{2} \cdot \beta_H / 100 \cdot I_{откл.H.}, \quad (8.17)$$

$$i_{a.H.} = \left(\sqrt{2} \cdot \frac{30}{100} \right) \cdot 20 = 8.5 \text{ кА},$$

- электродинамической стойкости:

$$I_{\kappa 1} \leq I_{np.c}, \quad (8.18)$$

$$4.22 \text{ кА} \leq 20 \text{ кА};$$

$$i_{y\partial} \leq i_{np.c}, \quad (8.19)$$

$$11 \text{ кА} \leq 50 \text{ кА};$$

- термической стойкости:

$$B_{\kappa} \leq I_{np.c}^2 \cdot t_{np.c}, \quad (8.20)$$

$$2.6 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 36 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Принятый к установке на низкого высокого напряжения на ГПП высоковольтный выключатель типа ВВУ-СЭЩ-П9-6 прошел необходимые проверки.

8.2 Выбор разъединителей

На стороне высокого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем разъединитель типа РГПЗ-СЭЩ-35.

Разъединитель выбираем и проверяем по следующим условиям:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{сети} \leq U_H, \quad (8.21)$$

$$35 \text{ кВ} \leq 35 \text{ кВ};$$

- значению номинального тока:

$$\begin{aligned} I_{\max} &< I_n, \\ 87 \text{ А} &< 1000 \text{ А}, \end{aligned} \quad (8.22)$$

- электродинамической стойкости:

$$\begin{aligned} i_{yd} &\leq i_{np.c}, \\ 12.4 \text{ кА} &\leq 64 \text{ кА}; \end{aligned} \quad (8.23)$$

- термической стойкости:

$$\begin{aligned} B_k &\leq I_{np.c}^2 \cdot t_{np.c}, \\ 3.6 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} &\leq 40 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}. \end{aligned} \quad (8.24)$$

Принятый к установке на стороне высокого напряжения на ГПП разъединитель типа РГПЗ-СЭЩ-35 прошел необходимые проверки.

8.3 Выбор трансформатора тока

На стороне высокого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем трансформатор тока типа ТОЛ-СЭЩ-35.

Трансформатор тока выбирается и проверяется по:

- уровню номинального напряжения:

$$\begin{aligned} U_{сети} &\leq U_n, \\ 35 \text{ кВ} &\leq 35 \text{ кВ}; \end{aligned} \quad (8.25)$$

- значению номинального тока:

$$I_{\max} \leq I_{H.TT}, \quad (8.26)$$
$$87 \text{ A} \leq 100 \text{ A};$$

- электродинамической стойкости:

$$i_{y0} \leq i_{\text{эдин.ст}}, \quad (8.27)$$
$$12.4 \text{ кА} \leq 50 \text{ кА};$$

- термической стойкости:

$$B_k \leq K_T^2 \cdot I_{1\text{ном.}}^2 \cdot t_T = I_T^2 \cdot t_T, \quad (8.28)$$
$$3.6 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 62.5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

- величине вторичной нагрузки:

$$Z_2 \leq Z_{2\text{ном}}, \quad (8.29)$$

где $Z_2 \approx R_2$

$$R_2 = R_{\text{приб}} + R_{\text{пр}} + R_{\kappa}, \quad (8.30)$$

К вторичной нагрузке трансформатора тока относится амперметр типа EQ96K мощностью 4 ВА. Определим активное сопротивление прибора:

$$R_{\text{приб}} = \frac{S_{\text{приб}}}{I_2^2}, \quad (8.31)$$

$$R_{приб} = \frac{4}{5^2} = 0.16 \text{ Ом}.$$

Значение максимально допустимого сопротивления проводов составит:

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

$$R_{np} = 1.2 - 0.16 - 0.1 = 0.94 \text{ Ом}.$$

Определим минимально допустимое сечение медного провода:

$$s = \frac{\rho \cdot l_p}{R_{np}}, \quad (8.32)$$

$$s = \frac{0.0175 \cdot 40}{0.94} = 0.745 \text{ мм}^2$$

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

Принятый к установке на стороне высокого напряжения на ГПП трансформатор тока типа ТОЛ-СЭЩ-35 прошел необходимые проверки.

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

Трансформатор тока выбирается и проверяется по:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (8.33)$$

$$6 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- значению номинального тока:

$$I_{\max} \leq I_{H.TT}, \quad (8.34)$$

$$513 \text{ A} \leq 600 \text{ A} ;$$

- электродинамической стойкости:

$$i_{y0} \leq i_{\text{эдин.ст}}, \quad (8.35)$$

$$11 \text{ кА} \leq 100 \text{ кА} ;$$

- термической стойкости:

$$B_k \leq K_T^2 \cdot I_{1\text{ном.}}^2 \cdot t_T = I_T^2 \cdot t_T, , \quad (8.36)$$

$$2.6 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 144 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} ;$$

- величине вторичной нагрузки:

$$Z_2 \leq Z_{2\text{ном}}, \quad (8.37)$$

где $Z_2 \approx R_2$

$$R_2 = R_{\text{приб}} + R_{\text{пр}} + R_{\kappa}, \quad (8.38)$$

К вторичной нагрузке трансформатора тока на стороне низкого напряжения ГПП относятся счетчик активной и реактивной энергии мощностью 0,25 ВА. Определим активное сопротивление прибора:

$$R_{\text{приб}} = \frac{S_{\text{приб}}}{I_2^2}, \quad (8.39)$$

$$R_{приб} = \frac{0.25}{5^2} = 0.01 \text{ Ом}.$$

Значение максимально допустимого сопротивления проводов составит:

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

$$R_{np} = 1 - 0.0088 - 0.05 = 0.94 \text{ Ом}.$$

Определим минимально допустимое сечение медного провода:

$$s = \frac{\rho \cdot l_p}{R_{np}}, \quad (8.40)$$

$$s = \frac{0.0175 \cdot 20}{1.09} = 0.321 \text{ мм}^2.$$

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-СЭЩ-10 прошел необходимые проверки.

По такому же принципу выбираем трансформаторы тока для отходящих линий.

8.4 Выбор трансформатора напряжения

На стороне высокого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем трансформатор напряжения типа НАМИ-СЭЩ-35.

Трансформатор напряжения выбирается и проверяется по:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{ср.ном} \leq U_{ном.тр}; \quad (8.41)$$

- по классу точности;
- по величине вторичной нагрузки:

$$S_{2\Sigma} \leq S_{ном}, \quad (8.42)$$

$$S_{2\Sigma} = \sqrt{(\Sigma S_{приб} \cos \phi)^2 + (\Sigma S_{приб} \sin \phi)^2} = \sqrt{P_{приб}^2 + Q_{приб}^2}. \quad (8.43)$$

К вторичной нагрузке трансформатора напряжения относятся вольтметры типа Ц42704 мощностью 4 ВА.

$$4 \text{ ВА} \leq 30 \text{ ВА}.$$

Принятый к установке на стороне высокого напряжения на ГПП трансформатор напряжения типа НАМИ-СЭЩ-35 прошел необходимые проверки.

На стороне низкого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем трансформатор напряжения типа ЗНОЛ-СЭЩ-6 класса точности 0,2.

К вторичной нагрузке трансформатора напряжения относятся счетчики активной и реактивной электрической энергии с общей активной мощностью 16 Вт и 8 вар.

$$18 \text{ ВА} \leq 30 \text{ ВА}.$$

Принятый к установке на стороне низкого напряжения на ГПП трансформатор напряжения типа ЗНОЛ-СЭЩ-6 прошел необходимые проверки.

8.5 Выбор жестких шин

Выбор жестких шин осуществляем по экономической плотности тока:

$$s = \frac{I_{\max}}{j_9}; \quad (8.44)$$

$$s = \frac{87}{1} = 87 \text{ мм}^2.$$

Выбираем шины ОЖ-СЭЩ-35 с максимальным продолжительным током 630А.

Определим минимальное сечение шины по условию термической стойкости:

$$s_{\min} = \frac{\sqrt{B_K} \cdot 10^3}{C_T}; \quad (8.45)$$

$$s_{\min} = \frac{\sqrt{3.6} \cdot 10^3}{66} = 32 \text{ мм}^2.$$

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

$$F_{\max}^3 = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{a} \cdot l \cdot i_{y\phi}^2 \cdot K_{\phi} \cdot K_p; \quad (8.46)$$

$$F_{\max}^3 = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{1.09} \cdot 3.6 \cdot 12400^2 \cdot 1 \cdot 1 = 104 \text{ Н}.$$

Определим значение момента сопротивления поперечного сечения шины по формуле:

$$W = \frac{\pi \cdot D^4 - d^4}{32D}; \quad (8.47)$$

$$W = \frac{\pi \cdot 8^4 - 6^4}{32 \cdot 8} = 34 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Найдем значение максимального напряжения в материале проводника:

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{\lambda \cdot W}; \quad (8.48)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{104}{8 \cdot 34 \cdot 10^{-6}} = 0.37 \text{ МПа}$$

Найдем значение момента инерции поперечного сечения проводника по формуле:

$$J = \frac{\pi \cdot D^4 - d^4}{64}. \quad (8.49)$$

$$J = \frac{\pi \cdot 8^4 - 6^4}{64} = 137 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4.$$

Найдем значение частоты собственных колебаний по формуле:

$$f_0 = \frac{r_1^2}{2 \cdot \pi \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m}}; \quad (8.50)$$

$$f_0 = \frac{3.14^2}{2 \cdot \pi \cdot 3.6^2} \cdot \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 137 \cdot 10^{-8}}{2.77}} = 22.8 \text{ Гц}.$$

При частоте собственных колебаний менее 30 Гц отсутствует механический резонанс.

8.6 Выбор изоляторов

Опорные изоляторы используются для установки шин. Устанавливаем изоляторы типа ИОС-35-1000.

Опорные изоляторы выбираются и проверяются по:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (8.51)$$

$$35 \text{ кВ} \leq 35 \text{ кВ};$$

- значению максимальной нагрузки на головку изолятора:

$$F_{\max} \leq F_{дон}; \quad (8.52)$$

$$104 \text{ Н} < 1948 \text{ Н}.$$

где

$$F_{дон} = 0.6 \cdot F_{разруш} \cdot \frac{H_u}{H}; \quad (8.53)$$

$$F_{дон} = 0.6 \cdot 10000 \cdot \frac{0.5}{1.54} = 1948 \text{ Н}.$$

где

$$H = H_u + b + \frac{h}{2}; \quad (8.54)$$

$$H = 0.5 + 1 + \frac{0.08}{2} = 1.54.$$

8.7 Выбор гибких шин

В качестве гибких шин при номинальном напряжении 35 кВ используются сталеалюминевые провода типа АС.

Определим необходимое сечение провода:

$$s = \frac{I_{\text{раб.ном}}}{j_{\text{э}}}; \quad (8.55)$$

$$s = \frac{62}{1} = 62 \text{ мм}^2.$$

Принимаем провода АС-70/11 мм² с максимальным значением продолжительного тока 265 А.

Определим наибольшую критическую напряженность электрического поля:

$$E_0 = 30.3 \cdot m \cdot \left(1 + \frac{0.299}{\sqrt{r_o}} \right); \quad (8.56)$$

$$E_0 = 30.3 \cdot 0.82 \cdot \left(1 + \frac{0.299}{\sqrt{0.57}} \right) = 34.7 \text{ кВ/м.}$$

Определим значение напряженности вблизи проводника:

$$E = \frac{0.354 \cdot U_{\text{н}}}{r_o \cdot \lg \frac{1.26 \cdot D}{r_o}}; \quad (8.57)$$

$$E = \frac{0.354 \cdot 37}{0.57 \cdot \lg \frac{1.26 \cdot 150}{0.57}} = 9.1 \text{ кВ/м.}$$

Проверим на отсутствие короны:

$$1.07E \leq 0.9E_o; \quad (8.58)$$

$$9.8 \text{ кВ/м} < 31.2 \text{ кВ/м.}$$

Принятый к установке на стороне высокого напряжения на ГПП в качестве гибких шин провод типа АС-70/11 прошел необходимые проверки.

8.8 Выбор ОПН

На стороне высокого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем ОПН-РК-35/40,5-10-760.

9 Расчет заземления ГПП

Вертикальные заземлители выполняем в виде металлического уголка с шириной полки 6 см и толщиной 5 мм, длину заземлителя принимаем равной 5 м. Заземлители забиваем в грунт вертикально на 0.5 м глубже поверхности земли, расстояние между заземлителями принимаем равным 10 м. Вертикальные заземлители соединяем между собой стальной полосой.

Определим значение допустимого сопротивления для заземляющего устройства в целом:

$$R_{\text{дон}} = \frac{\rho_{\text{грунт}}}{100} \cdot R_3; \quad (9.1)$$

$$R_{\text{дон}} = \frac{100}{100} \cdot 4 = 4 \text{ Ом.}$$

Определим сопротивление растекания для одиночного вертикального заземлителя:

$$R_{\text{г}} = 0.298 \cdot \rho_{\text{р.в.}} \cdot \kappa_c; \quad (9.2)$$

$$R_{\text{г}} = 0.298 \cdot 150 \cdot 1.5 = 67.1 \text{ Ом.}$$

где

$$\rho_{\text{р.в.}} = \kappa_c \cdot \rho_{\text{грунт}}; \quad (9.3)$$

$$\rho_{\text{р.в.}} = 1.5 \cdot 100 = 150 \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

Определим суммарное число вертикальных заземлителей:

$$n_{\text{г}} = \frac{R_{\text{г}}}{\eta_{\text{г}} \cdot R_{\text{дон}}}; \quad (9.4)$$

$$n_{\epsilon} = \frac{67.1}{0.7 \cdot 4} = 24 \text{ шт}$$

Определим необходимую протяженность горизонтального заземлителя:

$$l_z = a \cdot n_{\epsilon}; \quad (9.5)$$

$$l_z = 10 \cdot 24 = 240 \text{ м.}$$

Определим сопротивление растекания для горизонтального заземлителя:

$$R_z = \frac{0.366 \cdot \rho_{p.z.}}{l_z} \cdot \lg \frac{2l_z^2}{b \cdot t_o}; \quad (9.6)$$

$$R_z = \frac{0.366 \cdot 400}{240} \cdot \lg \frac{2 \cdot 240^2}{0.04 \cdot 0.5} = 4.1 \text{ Ом.}$$

где

$$\rho_{p.z.} = \kappa_c \cdot \rho_{\text{грунт}}; \quad (9.7)$$

$$\rho_{p.z.} = 4 \cdot 100 = 400 \text{ Ом};$$

Определим скорректированное сопротивление растекания для горизонтального заземлителя:

$$R_z' = \frac{R_z}{\eta_z}; \quad (9.8)$$

$$R_z' = \frac{4.1}{0.32} = 12.9 \text{ Ом};$$

Определим скорректированное сопротивление растекания для вертикальных заземлителей:

$$R_{\epsilon}^{\cdot} = \frac{R_{\epsilon}^{\cdot} \cdot R_{\partial on}}{R_{\epsilon}^{\cdot} - R_{\partial on}}; \quad (9.9)$$

$$R_{\epsilon}^{\cdot} = \frac{12.9 \cdot 4}{12.9 - 4} = 5.8 \text{ Ом.}$$

Определим скорректированное число вертикальных заземлителей:

$$n_{\epsilon}^{\cdot} = \frac{R_{\epsilon}}{\eta_{\epsilon} \cdot R_{\epsilon}^{\cdot}}; \quad (9.10)$$

$$n_{\epsilon} = \frac{67.1}{0.64 \cdot 5.8} \approx 18 \text{ шт}$$

Принимаем к установке на подстанции 18 вертикальных заземлителей.

Заключение

В бакалаврской работе определена расчетная электрическая нагрузка производства станков лазерного раскроя металла ЗАО «АЛРТ». Общая полная мощность предприятия с учетом высоковольтной нагрузки составила 6597 кВА.

Определены необходимое число и номинальная мощность силовых трансформаторов в КТП на примере цеха РМЦ. По минимуму приведенных затрат на основное оборудование КТП принята к установке двухтрансформаторная подстанция с силовыми трансформаторами ТМГ-160/10 и двумя конденсаторными установками АУКРМ 0,4 кВ мощностью по 90 квар.

Значение номинальной мощности силовых трансформаторов ГПП было определено с учетом допустимой 40% перегрузки в послеаварийном режиме. По шкале номинальных мощностей силовых трансформаторов и каталогу производителя были выбраны для дальнейшего рассмотрения два варианта: трансформаторы ТМН-4000/35/6 и следующий по шкале номинальных мощностей ТМН-6300/35/6. По минимальным приведенным затратам выбран к установке на ГПП первый вариант с силовыми трансформаторами ТМН-4000/35/6.

Выбраны схема ГПП и схема сети внутризаводского электроснабжения.

Определены значения токов короткого замыкания и выбрано основное электрооборудование ГПП: высоковольтные выключатели, разъединители, измерительные трансформаторы тока и напряжения и т.д. Все выбранное электрооборудование было проверено на стойкость к токам короткого замыкания.

Выполнен расчет заземления ГПП.

Список используемых источников

1. 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: 11.03.2018).
2. 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.
3. Ding H. Construction and Test of Three-Coil Magnet Power Supply System for a High-Pulsed Magnetic Field // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2018. vol. 28. no. 3. pp. 1-6.
4. Huang S. J., Dai S. H., Su J. L., Lee T. S. Design of a contactless power supply system with dual output capability for AGV applications // 2017 IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE). Nagoya. 2017. pp. 1-3.
5. Cho C. G., Song S. H., Park S. M., Ryoo H. J., Bae J. S., Jang S. R. Analysis and implementation of power supply system for xenon lamp // IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Beijing. 2017. pp. 829-833.
6. Комков В.А., Тимахова Н.С. Энергосбережение в жилищно-коммунальном хозяйстве: учебное пособие, 2-е изд. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. 204 с.
7. Хорольский В.Я., Таранов М.А., Петров Д.В. Техничко-экономические расчеты распределительных электрических цепей: учебное пособие. М.: Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2015. 96 с.
8. Мастепаненко М.А. Введение в специальность. Электроэнергетика и электротехника : учеб. пособие. Ставрополь : СтГАУ, 2015. 116 с.

9. Ополева Г. Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов : учеб. пособие. М. : ИД «ФОРУМ» : ИНФРА-М, 2018. 416 с.
10. Rajendra P. Fundamentals of electrical engineering. - PHI Learning Pvt. Ltd., 2014. 1064 p.
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. Кузнецов С.М. Проектирование тяговых и трансформаторных подстанций : учебное пособие. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2013. 92 с.
14. Данилов М.И. Романенко И.Г. Инженерные системы зданий и сооружений (электроснабжение с основами электротехники) [Электронный ресурс] : учебное пособие (курс лекций). Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2015. 223 с. URL: <http://www.iprbookshop.ru/63087.html> (дата обращения: 22.02.2018).
15. Zatsepina V. I., Zatsepin E. P. Reliability of power supply systems under the influence of negative factors // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). St. Petersburg. 2017. pp. 1-4.
16. Анчарова Т. В., Рашевская М.А., Стебунова. Е.Д. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений : учебник , 2-е изд., перераб. и доп. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2018. 415 с.
17. Хорольский В.Я., Таранов М.А. Надежность электроснабжения : учеб. пособие. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2017. 127 с.

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

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

20.Дайнеко В.А., Забелло Е.П., Прищепова Е.М. Эксплуатация электрооборудования и устройств автоматики: учебное пособие. М.: НИЦ ИНФРА-М, Нов. знание, 2015. 333 с.