



## Аннотация

Темой выпускной квалификационной работы является электроснабжение завода по производству насосного и воздуходувного оборудования.

В бакалаврской работе выполнен:

- расчет нагрузок от силовых электроприемников и систем внутреннего и наружного освещения укрупнено для каждого из цехов;
- выполнен выбор цеховых трансформаторов с учетом компенсации реактивной мощности;
- выполнено технико-экономическое обоснование выбора мощности силовых трансформаторов ГПП;
- определено целесообразное напряжение питания предприятия;
- рассчитаны токи короткого замыкания;
- выбрано и проверено на стойкость к токам короткого замыкания основное оборудование ГПП;
- произведен расчет заземления ГПП.

Выпускная квалификационная работа выполнена на 58 листах. Содержит 8 таблиц и 4 рисунка. Графическая часть бакалаврской работы состоит из 6 чертежей на формате А1.

## Содержание

Введение	4
1 Краткая характеристика предприятия	5
2 Расчет электрических нагрузок	8
3 Выбор типа, числа и мощности трансформаторов цеховых подстанций	13
4 Выбор типа, числа и мощности трансформаторов ГПП	24
5 Выбор схемы подстанции	33
6 Расчёт токов короткого замыкания	34
7 Расчет и выбор электрического оборудования и проводников	38
8 Расчет заземления подстанции	53
Заключение	56
Список использованных источников	57

## Введение

Согласно ПУЭ потребителем электрической энергии (ЭЭ) называется отдельный электроприемник или их группа, размещающиеся на определенной территории и объединенные общим для них технологическим процессом [1-4].

Систему электроснабжения промышленных предприятий (ЭСПП) условно разделяют на три подсистемы:

- систему внешнего электроснабжения – это сети напряжением 35–220 кВ, соединяющие ТП энергосистемы с приемными подстанциями предприятия (например, главной понизительной подстанции);

- систему внутризаводского электроснабжения – это подстанция предприятия на которую поступает электроэнергия из системы, собственная электростанция и совокупность электрических распределительных сетей 6-10 кВ, расположенных на территории предприятия и осуществляющих прием, распределение и передачу ЭЭ к распределительным пунктам и трансформаторным подстанциям;

- система внутрицехового электроснабжения – это совокупность внутрицеховых ТП, распределительных сетей, распределительных пунктов или шинопроводов и сетей непосредственного питания ЭП напряжением до 1000 В.

Целью работы является разработка надежной и экономичной системы электроснабжения завода по производству насосного и воздуходувного оборудования.

## **1 Краткая характеристика предприятия**

ООО «СМЗ» является одним из ведущих российских производителей промышленного оборудования для сферы водоснабжения и водоотведения.

ООО «СМЗ» было создано в 2009 г. на базе Станкостроительного Завода, чья история ведется с 1926 года.

Основными направлениями деятельности завода являются производство насосного, воздуходувного оборудования, а также оборудования для комплектации очистных сооружений.

На заводе выпускаются:

- погружные канализационные насосы;
- трубчатые и дисковые аэраторы;
- шкафы (щиты) управления насосами;
- канализационные насосные станции (КНС);
- шнековые обезвоживатели осадка и многое другое.

В 2009 году «СМЗ» взял курс на освоение научно-технических разработок в сфере водоснабжения и водоотведения, которые легли в основу разработки новой линейки оборудования под маркой «КИТ» - погружных канализационных и дренажных насосов, компрессоров, воздуходувок, систем автоматического управления к ним, станций ультрафиолетового обеззараживания. Сохранив накопленный опыт в машиностроении, традиции жесткого контроля качества, завод производит продукцию, способную заменить импортные аналоги, при этом предлагая доступные цены и высокий уровень инженерного сопровождения и сервисного обслуживания. В настоящий момент СМЗ является одним из лидирующих заводов по производству насосного оборудования высокого класса. Благодаря современным технологиям насосный завод СМЗ производит широкий ассортимент надежного насосного, воздуходувного оборудования, а также оборудования для комплектации очистных сооружений.

## 1.1 Характеристика потребителей электроэнергии на предприятии

Сведения об установленной мощности электроприемников по цехам предприятия приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Сведения об установленной мощности электроприемников по цехам предприятия

№ п/п	Название цеха	Рном, кВт	пэ, шт
1	Сборочный корпус	6030	140
2	Ремонтно-механический цех	435	39
3	Сборочный цех №2	640	48
4	Гараж	95	17
5	Гальванический цех	5100	36
6	Дерево-обрабатывающий цех	441	25
7	Литейный цех	4091	127
8	Механический цех №1	2360	73
9	Обмоточный цех	1799	160
10	Штамповочный цех	2015	45
11	Механический цех №2	4760	50
12	Сборочный электроцех	1882	84
13	Автоматный цех	2814	187
14	Компрессорная	32	5
15	Склад №1	40	8
16	Корпус №3	730	51
17	Склад №1	10	7
18	Инструментальный цех	2053	37

Генплан завода представлен на рисунке 1.1.

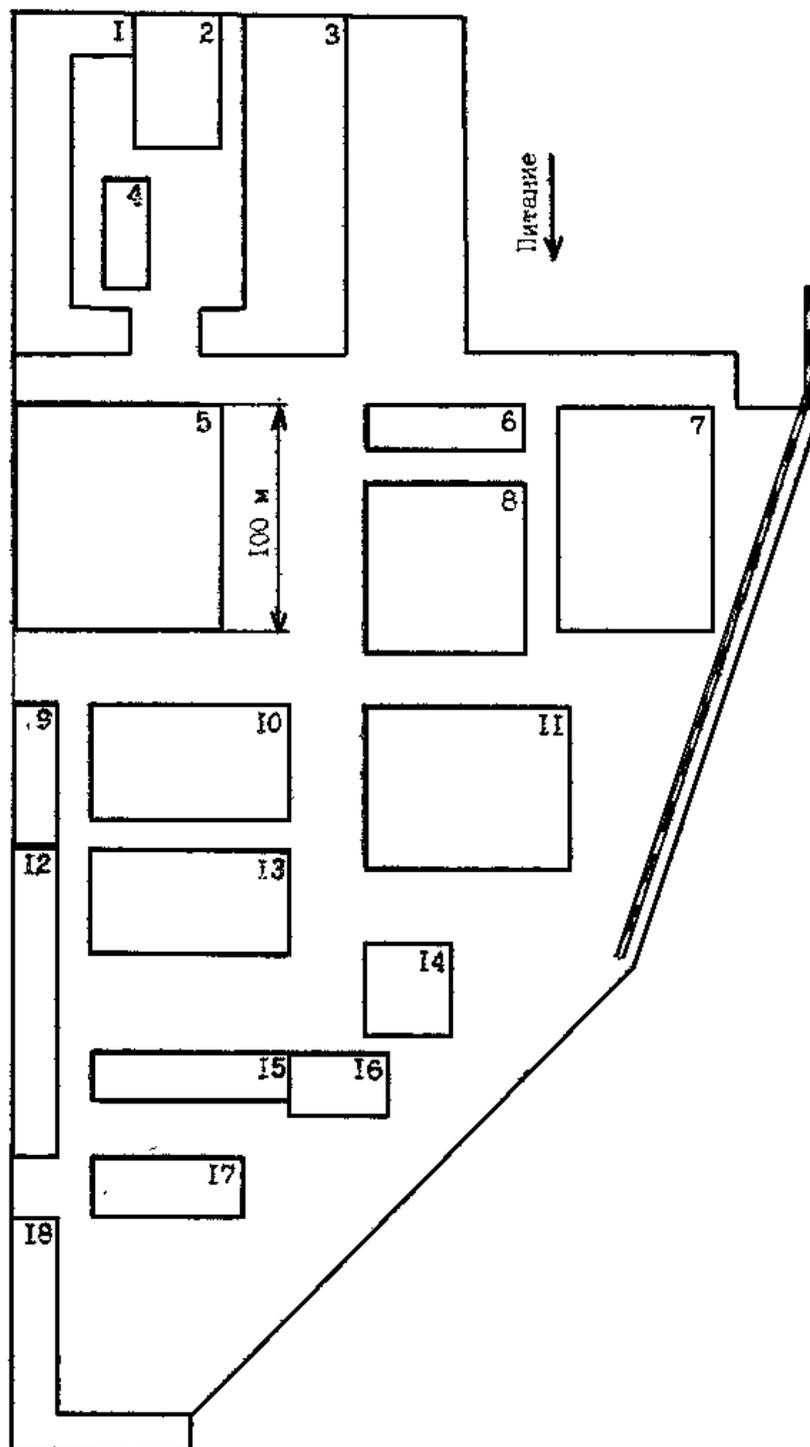


Рисунок 1.1 - Генплан завода

## 2 Расчет электрических нагрузок

Правильное определение величин электрических нагрузок является одним из основополагающих факторов на стадии проектирования и при дальнейшей эксплуатации электрических сетей предприятия [2, 5-7].

Обычно расчет электрических нагрузок ведется от первого уровня к шестому. При проектировании же крупного предприятия иногда стоит задача определения расчетной нагрузки сразу на высшем уровне. Тогда применяют комплексный метод расчета нагрузки. За основу берется информационная база аналогичного завода.

Применение комплексного метода предусматривает совместное использование нескольких способов определения расчетной нагрузки  $P_{расч}$  по: энергоемкости продукции; общегодовому энергопотреблению; удельным мощностям нагрузок; среднегодовому коэффициенту спроса; средней мощности и коэффициенту максимума.

Исходя из предполагаемого электрооборудования цехов предприятия, находим по справочным данным значения коэффициентов использования и коэффициентов мощности характерных электроприемников цеха.

Для каждого цеха предприятия определяются средние за наиболее загруженную смену активные и реактивные электрические нагрузки:

$$P_c = K_u \cdot P_n, \quad (2.1)$$

$$Q_c = K_u \cdot P_n \cdot tg\varphi. \quad (2.2)$$

Используя найденные по формулам значения эффективного числа электроприемников и групповой коэффициент использования, по справочным таблицам определяем значение коэффициента максимума и находим расчетные активную и реактивную нагрузки:

$$P_p = K_m \cdot P_c, \quad (2.3)$$

$$Q_p = 1.1Q_c \text{ при } n_s \leq 10, \quad (2.4)$$

$$Q_p = Q_c \text{ при } n_s > 10. \quad (2.5)$$

Расчетную нагрузку от системы освещения определяем по следующей формуле:

$$P_{осв} = K_c \cdot P_{yo} \cdot F_n, \quad (2.6)$$

Суммируем расчетные активные нагрузки от силовых ЭП и от системы освещения, суммируем расчетные реактивные нагрузки и определяем полную расчетную нагрузку в целом по цеху на стороне 0,4 кВ.

Рассчитываем строку «Итого по нагрузке 0,4 кВ».

Расчетную нагрузку высоковольтных электроприемников определяем также, как и для низковольтных.

Рассчитываем строку «Итого по высоковольтной нагрузке».

Рассчитываем строку «Итого по предприятию».

Результаты расчетов сводим в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты расчета нагрузок по предприятию

№	Название цеха	$P_n$ , 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	$P_{P.O.}$ , кВт	$P_P + P_{P.O.}$ , кВт	$Q_P$ , квар	$S_P$ , кВ·А
<b>Нагрузка 0,4 кВ</b>															
1	Сборочный корпус	6030	43.07	140	0.35	0.7	1.02	2110.5	2153.14	1.07	2258.24	38.10	2296.34	2153.14	3147.89
2	Ремонтно-механический цех	435	11.15	39	0.35	0.55	1.52	152.25	231.19	1.17	178.13	18.94	197.07	231.19	303.78
3	Сборочный цех №2	640	13.33	48	0.35	0.7	1.02	224	228.53	1.15	257.60	62.60	320.20	228.53	393.39
4	Гараж	95	5.59	17	0.2	0.65	1.17	19	22.21	1.61	30.59	1.77	32.36	22.21	39.25
5	Гальванический цех	5100	141.67	36	0.6	0.78	0.80	3060	2454.98	1.12	3427.20	76.92	3504.12	2454.98	4278.53
6	Дерево-обрабатывающий цех	441	17.64	25	0.55	0.75	0.88	242.55	213.91	1.15	278.93	10.65	289.58	213.91	360.02
7	Литейный цех	4091	32.21	127	0.4	0.65	1.17	1636.4	1913.16	1.06	1734.58	57.51	1792.10	1913.16	2621.41

Продолжение таблицы 2.1

№	Название цеха	$P_n$ , 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	$P_{P.O.}$ , кВт	$P_P + P_{P.O.}$ , кВт	$Q_P$ , квар	$S_P$ , кВт·А
8	Механический цех №1	2360	32.33	73	0.2	0.55	1.52	472	716.72	1.19	561.68	42.60	604.28	716.72	937.47
9	Обмоточный цех	1799	11.24	160	0.3	0.6	1.33	539.7	719.60	1.08	582.88	10.06	592.93	719.60	932.41
10	Штамповочный цех	2015	44.78	45	0.35	0.65	1.17	705.25	824.53	1.15	811.04	38.10	849.14	824.53	1183.59
11	Механический цех №2	4760	95.20	50	0.25	0.55	1.52	1190	1806.99	1.2	1428.00	53.97	1481.97	1806.99	2336.97
12	Сборочный электроцех	1882	22.40	84	0.45	0.7	1.02	846.9	864.01	1.1	931.59	21.90	953.49	864.01	1286.72
13	Автоматный цех	2814	15.05	187	0.7	0.76	0.86	1969.8	1684.50	1.04	2048.59	38.10	2086.70	1684.50	2681.76
14	Компрессорная	32	6.40	5	0.7	0.8	0.75	22.4	16.80	1.26	28.22	2.99	31.22	18.48	36.28
15	Склад №1	40	5.00	8	0.15	0.7	1.02	6	6.12	2.31	13.86	3.40	17.26	6.73	18.53
16	Корпус №3	730	14.31	51	0.7	0.65	1.17	511	597.43	1.08	551.88	8.00	559.88	597.43	818.77

Продолжение таблицы 2.1

№	Название цеха	$P_n$ , 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	$P_{P.O.}$ , кВт	$P_P + P_{P.O.}$ , кВт	$Q_P$ , квар	$S_P$ , кВт·А
17	Склад №2	10	1.43	7	0.2	0.75	0.88	2	1.76	2.1	4.20	3.73	7.93	1.94	8.16
18	Инструментальный цех	2053	55.49	37	0.4	0.6	1.33	821.2	1094.93	1.15	944.38	26.62	971.00	1094.93	1463.46
	Наружное освещение	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	72.50	---	---	72.50
	<b>Всего</b>	35327	1,4...141,7	1139	0.40	0.67	1.12	14531	15550.52	1	14531	588.46	15119.4	15552.99	21690.83

### **3 Выбор типа, числа и мощности трансформаторов цеховых подстанций**

В системах электроснабжения предприятий широко применяются комплектные трансформаторные подстанции (КТП) [2, 8-11]. КТП комплектуются трехфазными силовыми трансформаторами с номинальными мощностями: 250, 400, 630, 1000, 1600 и 2500 кВА, с первичным напряжением 6-10 кВ и вторичным напряжением 0,4-0,69 кВ.

По месту расположения на территории промышленного предприятия подстанции классифицируются как:

- внутрицеховые – подстанции, располагающиеся внутри производственных зданий, не имеющие общих стен с цехом, с размещением электрических аппаратов в производственном или отделенном закрытом помещении с выходом в цех;

- встроенные - подстанции, располагающиеся в отдельных помещениях, имеющих общую стену с основным зданием, но с выкаткой силовых трансформаторов и установленных выключателей наружу здания;

- пристроенные - подстанции, имеющие общую стену с основным зданием, но расположенные снаружи производственного корпуса;

- отдельностоящие – подстанции расположенные на определенном расстоянии от производственных корпусов.

Со стороны низкого напряжения устанавливается блок предохранитель-выключатель типа БПВ, автоматы типов АВМ, АЗ700, Электрон, ВА или импортного производства.

Комплектные трансформаторные подстанции можно разделить:

- на однотрансформаторные;

- на двухтрансформаторные.

Плотность электрической нагрузки цеха определим по формуле:

$$\sigma = \frac{S_P}{F_{Ц}}, \quad (3.1)$$

Найдем общее количество силовых трансформаторов на цеховых подстанциях в целом по цеху:

$$N_0 = \frac{P_P}{K_3 \cdot S_{НОМ.Т}} \quad (3.2)$$

где  $P_P$  – величина расчетной активной нагрузки в целом по цеху от низковольтных электроприемников;

$K_3$  – допустимый коэффициент загрузки цеховых силовых трансформаторов в нормальном режиме работы;

$S_{НОМ.Т}$  – выбранная номинальная мощность силового трансформатора.

К установке принимаем ближайшее большее целое число силовых трансформаторов  $N$ .

Количество силовых трансформаторов, устанавливаемых на одной подстанции, определяется в зависимости от категории надежности подключенных к ней электроприемников.

Выбираем внутрицеховые КТП как наиболее экономичные.

### **3.1 Выбор силовых трансформаторов для ремонтно-механического цеха**

Распределение мощности:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= S_P / F_{ц}, & (3.3) \\ \bar{\sigma} &= 303,78 / 2367 = 0,128. \end{aligned}$$

Так как  $\beta$  меньше, чем 0.2, выбираем силовые трансформаторы мощностью до 1000 кВА.

По справочным таблицам каталогов производителей находим  $\Delta P_{TP} = 1,78$  кВт ;  $\Delta Q_{TP} = 9,73$  квар;

$$P_P = P_{P\Sigma} + n_m \cdot \Delta P_{mp} , \quad (3.4)$$

$$P_P = 197,07 + 1 \cdot 1,78 = 198,85 \text{ кВт},$$

$$Q_P = Q_{P\Sigma} + n_m \cdot \Delta Q_{mp} , \quad (3.5)$$

$$Q_P = 231.19 + 1 \cdot 9,73 = 240,9 \text{ квар}.$$

1. Определим значения входных реактивных мощностей:

$$a) \quad Q'_{\text{э}1} = Q_P - 0,7 Q_{\text{с}0} , \quad (3.6)$$

$$Q'_{\text{э}1} = 240,9 - 0,7 \cdot 0 = 240,9 \text{ квар};$$

$$Q''_{\text{э}1} = \alpha P_P , \quad (3.7)$$

$$Q''_{\text{э}1} = 0,28 \cdot 198,85 = 55,68 \text{ квар}.$$

Из найденных значений принимаем наименьшее:  $Q_{\text{э}1} = 55,68$  квар.

$$b) \quad Q_{\text{min}} = 0,53 \cdot 231,19 = 122,53 \text{ квар}.$$

$$Q_{\text{э}2,\text{в}} = Q_{\text{min}} - Q_{\text{к}0} = Q_{\text{min}} - (Q_P - Q_{\text{э}1}), \quad (3.8)$$

$$Q_{\text{э}2,\text{в}} = 122,53 - (240,9 - 55,68) = -62,72 \text{ квар};$$

$$Q_{\text{э}2,\text{н}} = Q_{\text{min}} + Q_{\text{к}}, \quad (3.9)$$

$$Q_{\text{э}2,\text{н}} = 122,53 + 0 = 122,53 \text{ квар};$$

$$Q_{\text{к}} = 0.$$

Так как в часы минимальных нагрузок напряжение будет повышенным, то  $Q_{\text{э}2} = Q_{\text{э}2,\text{н}} = 122,53$  квар.

2. Найдем суммарную мощность КУ:

$$Q_{ку\max} = 1,15 \cdot Q_p - Q_{\varepsilon 1}, \quad (3.10)$$

$$Q_{ку\max} = 1,15 \cdot 240,9 - 55,68 = 221,38 \text{ квар.}$$

При этом мощность конденсаторных установок без ступеней регулирования:

$$Q_{ку\min} = Q_{\min} - Q_{\varepsilon 2}, \quad (3.11)$$

$$Q_{ку\min} = 122,53 - 122,53 = 0.$$

Таким образом, все установки должны быть регулируемыми.

### 3. Определяем мощность трансформаторов

$$\delta = \frac{\sqrt{P_p^2 + Q_p^2}}{S_{\varepsilon}}, \quad (3.12)$$

$$\delta = \frac{\sqrt{198,85^2 + 240,92^2}}{2367} \approx 0,13 \text{ кВА/м}^2 \Rightarrow S_{HT} = 250 \text{ кВА.}$$

### 4. Определяем число трансформаторов

$$N_T = \frac{P_{p\Sigma}}{K_3 S_{HT}}, \quad (3.13)$$

$$N_T = \frac{197,07}{0,9 \cdot 250} = 0,88$$

где  $K_3 = 0,9$ .

Принимаем ближайшее большее целое число трансформаторов  $N_T = 1$ .

5. Определяем РМ, которую можно передать через силовые трансформаторы из сети 10кВ в сеть 0,4кВ, и которая не должна компенсироваться

$$Q_{эH} = Q_{э1} - Q_6, \quad (3.14)$$

$$Q_{эH} = 55,68 - (240,92 - 231,19) = 45,94 \text{ квар.}$$

6. Определим значение реактивной мощности, которое целесообразно передать через цеховые трансформаторы в сеть U до 1000 В:

$$Q_T = \sqrt{(N_T K_3 S_H)^2 - P_{p\Sigma}^2}, \quad (3.15)$$

$$Q_T = \sqrt{(1 \cdot 0,9 \cdot 250)^2 - 197,07^2} = 108,58 \text{ квар,}$$

$$Q_{KVH} = Q_{P\Sigma} - Q_T, \quad (3.16)$$

$$Q_{KVH} = 231,19 - 108,58 = 122,6 \text{ квар,}$$

$$Q_{KVB} = Q_{KV \max} - Q_{KVH}, \quad (3.17)$$

$$Q_{KVB} = 221,38 - 122,6 = 98,8 < 800 \text{ квар.}$$

Установка БК на стороне 10 кВ нецелесообразна.

Принимаем однитрансформаторную КТП с трансформатором типа ТМГ-250/10 и КУ типа АУКРМ 0,4 на 150 квар.

7. Находим время максимальных потерь

$$\tau = \left( 0,124 + \frac{T_M}{10000} \right)^2 \cdot T_P, \quad (3.18)$$

$$\tau = \left( 0,124 + \frac{4500}{10000} \right)^2 \cdot 8760 = 2886 \text{ ч,}$$

8. Определяем стоимость потерь электроэнергии в силовом трансформаторе за год.

Найдем удельную стоимость потерь холостого хода в трансформаторе

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

$$C_{XX} = \left( \frac{361,9 \cdot 12}{4500} + 1,35 \right) \cdot 8760 = 20,279 \text{ тыс.руб/кВт} ,$$

Найдем удельную стоимость активных нагрузочных потерь

$$C_{K3} = \left( \frac{\alpha \cdot 12}{T_M} + \beta \right) \cdot \tau , \quad (3.20)$$

$$C_{K3} = \left( \frac{361,9 \cdot 12}{4500} + 1,35 \right) \cdot 2886 = 6,681 \text{ тыс.руб/кВт} ,$$

$$C \cdot \Delta P_T = C_{XX} \cdot \Delta P_{XX} + C_{K3} \cdot K_3^2 \cdot \Delta P_{K3} , \quad (3.21)$$

$$C \cdot \Delta P_T = 20,279 \cdot 0,55 + 6,681 \cdot 0,9^2 \cdot 3,1 = 27,929 \text{ тыс.руб.}$$

9. Найдем приведенные затраты на сооружение КТП

$$Z_{КТП} = E \cdot (K_T \cdot N_T + K_{KV} \cdot N_{KV}) + C \cdot \Delta P \cdot N_T , \quad (3.22)$$

$$Z_{КТП} = 0,223 \cdot ((146,7 \cdot 1) + (60,8 \cdot 1)) + (27,929 \cdot 1) = 74,2 \text{ тыс.руб.}$$

Рассмотрим вариант с силовым трансформатором ТМГ-400/10.

По справочным таблицам каталогов производителей находим  $\Delta P_{TP} = 2,9 \text{ кВт}$  ;  $\Delta Q_{TP} = 15,6 \text{ квар}$ ;

$$P_P = P_{P\Sigma} + n_m \cdot \Delta P_{mp} , \quad (3.23)$$

$$P_P = 197,07 + 1 \cdot 2,9 = 199,92 \text{ кВт},$$

$$Q_P = Q_{P\Sigma} + n_m \cdot \Delta Q_{mp} , \quad (3.24)$$

$$Q_P = 231,19 + 1 \cdot 15,6 = 246,76 \text{ квар.}$$

10. Определим значения входных реактивных мощностей:

$$a) \quad Q'_{\text{э1}} = Q_P - 0,7 Q_{\text{сд}}, \quad (3.25)$$

$$Q'_{\text{э1}} = 246.76 - 0,7 \cdot 0 = 246.79 \text{ квар};$$

$$Q''_{\text{э1}} = \alpha P_P, \quad (3.26)$$

$$Q''_{\text{э1}} = 0,28 \cdot 199.92 = 55.99 \text{ квар}.$$

Из найденных значений принимаем наименьшее:  $Q_{\text{э1}} = 55.99$  квар.

$$б) \quad Q_{\text{min}} = 0,53 \cdot 231.19 = 122.53 \text{ квар}.$$

$$Q_{\text{э2,в}} = Q_{\text{min}} - Q_{\text{кд}} = Q_{\text{min}} - (Q_P - Q_{\text{э1}}), \quad (3.27)$$

$$Q_{\text{э2,в}} = 122.53 - (246.76 - 55.99) = -68.26 \text{ квар};$$

$$Q_{\text{э2,н}} = Q_{\text{min}} + Q_{\text{к}}, \quad (3.28)$$

$$Q_{\text{э2,н}} = 122.53 + 0 = 122.53 \text{ квар};$$

$$Q_{\text{к}} = 0.$$

Так как в часы минимальных нагрузок напряжение будет повышенным, то  $Q_{\text{э2}} = Q_{\text{э2,н}} = 122.53$  квар.

11. Найдем суммарную мощность КУ:

$$Q_{\text{куmax}} = 1,15 \cdot Q_P - Q_{\text{э1}}, \quad (3.29)$$

$$Q_{\text{куmax}} = 1,15 \cdot 246.8 - 55.99 = 227.8 \text{ квар}.$$

При этом мощность конденсаторных установок без ступеней регулирования:

$$Q_{\text{куmin}} = Q_{\text{min}} - Q_{\text{э2}}, \quad (3.30)$$

$$Q_{\text{куmin}} = 122.53 - 122.53 = 0.$$

Таким образом, все установки должны быть регулируемы.

12. Определяем РМ, которую можно передать через силовые трансформаторы из сети 10кВ в сеть 0,4кВ, и которая не должна компенсироваться

$$Q_{эH} = Q_{э1} - Q_6, \quad (3.31)$$

$$Q_{эH} = 55,99 - (246,76 - 231,19) = 40,4 \text{ квар.}$$

13. Определим значение реактивной мощности, которое целесообразно передать через цеховые трансформаторы в сеть U до 1000 В:

$$Q_T = \sqrt{(N_T K_3 S_H)^2 - P_{p\Sigma}^2}, \quad (3.32)$$

$$Q_T = \sqrt{(1 \cdot 0,9 \cdot 400)^2 - 197,07^2} = 301,3 \text{ квар,}$$

$$Q_{KVH} = Q_{P\Sigma} - Q_T, \quad (3.33)$$

$$Q_{KVH} = 231,19 - 301,3 = -70 \text{ квар,}$$

$$Q_{KYB} = Q_{KV \max} - Q_{KVH}, \quad (3.34)$$

$$Q_{KYB} = 227,82 < 800 \text{ квар.}$$

Установка БК нецелесообразна.

Принимаем однитрансформаторную КТП с трансформатором типа ТМГ-400/10.

14. Определяем стоимость потерь электроэнергии в силовом трансформаторе за год

$$C \cdot \Delta P_T = C_{XX} \cdot \Delta P_{XX} + C_{K3} \cdot K_3^2 \cdot \Delta P_{K3}, \quad (3.35)$$

$$C \cdot \Delta P_T = 20,279 \cdot 0,8 + 6,681 \cdot 0,9^2 \cdot 5,5 = 45,987 \text{ тыс.руб,}$$

15. Найдем приведенные затраты на сооружение КТП:

$$Z_{КТП} = E \cdot (K_T \cdot N_T + K_{KV} \cdot N_{KV}) + C \cdot \Delta P \cdot N_T, \quad (3.36)$$

$$Z_{КТП} = 0,223 \cdot (191,8 \cdot 1) + (45,987 \cdot 1) = 88,8 \text{ тыс.руб.}$$

По наименьшим приведенным затратам окончательно принимаем однострансформаторную КТП с трансформатором типа ТМГ-250/10. Компенсация реактивной мощности осуществляется на стороне 0,4 кВ КУ типа АУКРМ 0,4 на 150 квар.

Для остальных цехов расчеты выполняем аналогично, результаты сводим в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты выбора трансформаторов КТП предприятия

№	Наименование цехов предприятия	$\sigma$ , кВА/м <sup>2</sup>	$P_p$ , кВт	Категория надежности электроснаб.	Принято к установке		
					$S_{ном.т}$	$S_{ном.т}$	$S_{ном.т}$
1	2	3	4	5	6	7	8
1+4	Сборочный корпус Гараж	0,620 0,037	2296,34 32,36	2 3	1600	2	1
2	Ремонтно- механический цех	0.134	197.07	3	400	1	1
3	Сборочный цех №2	0.050	320.20	2	250	2	1
5	Гальванический цех	0.445	3504.12	2	1000	2	2
6	Дерево- обрабатывающий цех	0.270	289.58	3	400	1	1
7	Литейный цех	0.365	1792.10	2	1000	2	1
8	Механ. цех №1	0.176	604.28	2	400	2	1
9	Обмоточный цех	0.742	592.93	2	400	2	1
10	Штамповочный цех	0.248	849.14	2	250	2	2
11	Механ. цех №2	0.346	1481.97	2	1000	2	1

Продолжение таблицы 3.1

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
12	Сборочный электроцех	0.443	953.49	2	250	2	2
13	Автоматный цех	0.537	2086.70	2	1600	2	1
16	Корпус №3	0,546	559,87	2	400	2	1
+14	Компрессорная	0,020	31,22	1			
+15	Склад №1	0,010	17,26	3			
+17	Склад №2	0,004	7,93	3			
18	Инструментальный цех	0.440	971.00	2	250	2	2

#### 4 Выбор типа, числа и мощности трансформаторов ГПП

Величина напряжения питания ГПП промышленного предприятия зависит от напряжения возможного источника питания, расстояния от подстанции предприятия до этого источника питания, возможности размещения высоковольтных воздушных и кабельных линий электропередачи, условий окружающей среды и ряда других факторов [12, 13, 14].

Величина рационального напряжения может быть определена по формуле Стилла:

$$U_{РАЦi} = 4.34 \cdot \sqrt{L_i + 0.016 \cdot P_{PI}}, \quad (4.1)$$
$$U_{РАЦi} = 4.34 \cdot \sqrt{3 + 0.016 \cdot 15273} = 68,3 \text{ кВ}$$

где  $L_i$  – длина линии от главной понизительной подстанции предприятия до источника питания;

$P_{PI}$  – значение активной расчетной нагрузки промышленного предприятия на стороне низкого напряжения главной понизительной подстанции предприятия.

Найдем активную расчетную нагрузку промышленного предприятия:

$$P_{PI} = P_{PH} + P_{PB} + P_{OCB} + \Delta P_{T\Sigma}, \quad (4.2)$$
$$P_{PI} = 15119 + 154 = 15273 \text{ кВт}$$

где  $P_{PH}$  - суммарное расчетное значение активной нагрузки 0,4 кВ всех цехов предприятия и сторонних потребителей получающих питание от данной ГПП;

$P_{PB}$  - суммарное расчетное значение активной нагрузки высоковольтных электроприемников предприятия;

$P_{OCB}$  - суммарное расчетное значение активной нагрузки системы внутрицехового электрического освещения и установок наружного освещения предприятия;

$\Delta P_{T\Sigma}$  - суммарное значение потерь активной мощности в цеховых силовых трансформаторах.

Определим значение полной расчетной мощности промышленного предприятия:

$$S_{P\Pi i} = \sqrt{P_{P\Pi}^2 + Q_{\text{ЭCi}}^2}, \quad (4.3)$$

$$S_{P\Pi i} = \sqrt{15273^2 + 3513^2} = 15672 \text{ кВА}$$

где  $Q_{\text{ЭCi}}$  - значение экономически целесообразной реактивной мощности, потребляемой предприятием из энергосистемы, на стороне ВН ГПП.

$$Q_{\text{ЭCi}} = P_{P\Pi} \cdot \operatorname{tg} \phi_i, \quad (4.4)$$

$$Q_{\text{ЭCi}} = 15273 \cdot 0.23 = 3513 \text{ квар}$$

Поскольку на предприятии присутствуют потребители, относящиеся к первой категории по надежности электроснабжения, то принимаем к установке на ГПП два силовых трансформатора. Номинальную мощность силовых трансформаторов определяем, учитывая возможную 40% перегрузку в послеаварийном режиме и коэффициента участия в нагрузке потребителей, относящихся к первой категории по надежности электроснабжения:

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

$$S_{\text{номт}} \approx 0,8 \cdot 15672 \cdot \frac{1}{1,4} = 8955 \text{ кВА}$$

Согласно полученному значению полной мощности предприятия принимаем для последующего рассмотрения силовые трансформаторы с  $S_{ном}$  равной 10 и 16 МВА.

Выбираем по каталогу производителя силовые трансформаторы марок: ТДН-10000/35/10 и ТДН-16000/35/10.

#### 4.1 Технико-экономическое обоснование оптимальной номинальной мощности силового трансформатора ГПП

4.1.1 Вариант главной понизительной подстанции с силовыми трансформаторами ТДН-10000/35/10.

Технические характеристики силового трансформатора ТДН-10000/35/10 приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Технические характеристики силового трансформатора ТДН-10000/35/10

Марка СТ	$S_{ном}$ , МВА	Данные из каталога производителя						Стоимость 1го тр-ра, тыс.руб
		$U_{ном}$ , кВ		$U_k$ , %	$\Delta P_k$ , кВт	$\Delta P_x$ , кВт	$I_x$ , %	
		ВН	НН					
ТДН-10000/35	10	37	10,5	8	60	12	0.75	7890

Определим приведенные потери активной и реактивной мощности в стали силового трансформатора на холостом ходу:

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

$$\Delta P_x' = 12 + 0,05 \cdot 75 = 15.75 \text{ кВт},$$

где

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

$$\Delta Q_x = 0,75 \cdot 10\,000 / 100 = 75 \text{ квар},$$

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

Находим приведенные нагрузочные потери мощности трансформатора:

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

$$\Delta Q_{\kappa} = 8 \cdot 10\,000 / 100 = 800 \text{ квар},$$

$$\Delta P'_{\kappa} = \Delta P_{\kappa} + K_{\text{ип}} \cdot \Delta Q_{\kappa}, \quad (4.9)$$

$$\Delta P'_{\kappa} = 60 + 0,05 \cdot 800 = 100 \text{ кВт}.$$

Коэффициент загрузки трансформатора:

$$K_3 = \frac{S_{\text{нагр}}}{S_{\text{ном.т}}}, \quad (4.10)$$

$$K_3 = \frac{15.672}{10} = 1.567.$$

Приведенные потери активной мощности в силовом трансформаторе:

$$P'_m = \Delta P'_x + K_3^2 \cdot \Delta P'_{\kappa}, \quad (4.11)$$

$$P'_m = 15.75 + 1.567^2 \cdot 100 = 261.4 \text{ кВт}.$$

На основании суммарного годового графика нагрузки ГПП (рисунок 4.1) определяются потери электроэнергии в трансформаторах ПС  $\Delta W$  и их стоимость  $I_{\Delta W}$ :

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

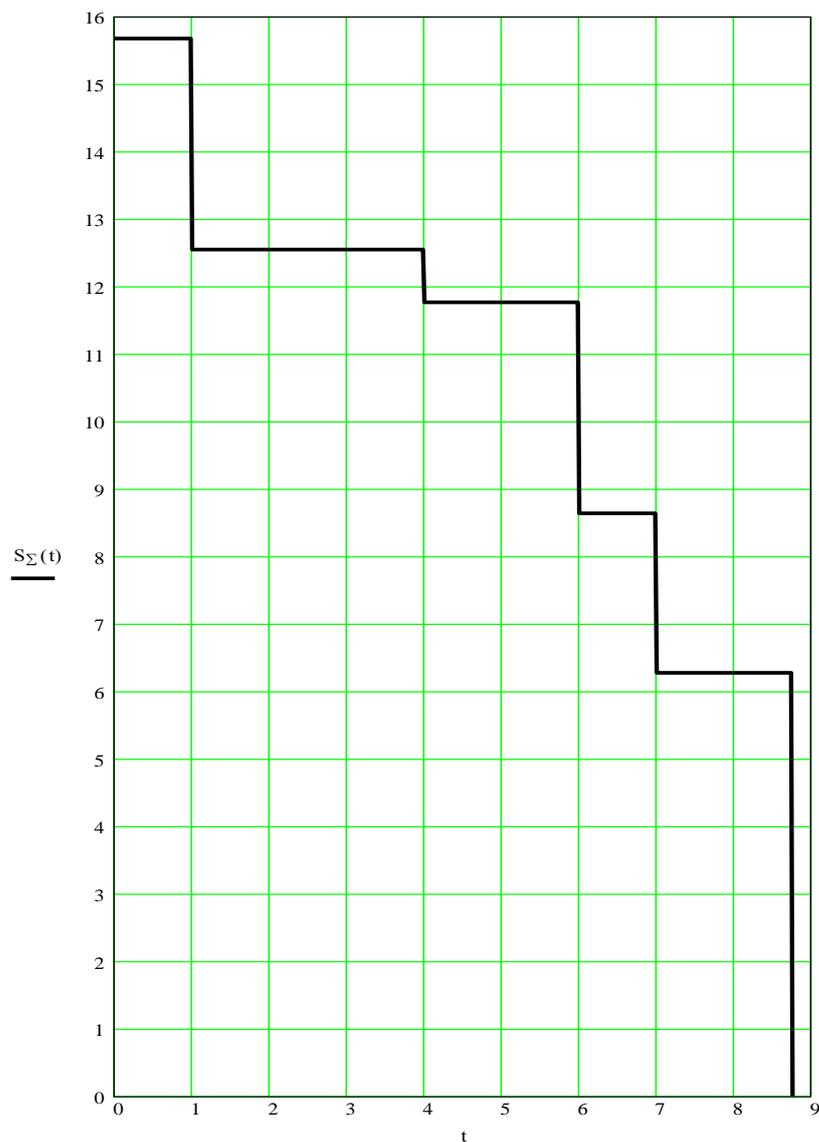


Рисунок 4.1 - Годовой график нагрузки ГПП

Результаты расчетов потерь электрической энергии в силовых трансформаторах ГПП ТДН - 10000/35/10 заносим в таблицу 4.2.

На основании суммарных значений потерь холостого хода и короткого замыкания находим стоимость потерь электроэнергии в силовом трансформаторе ГПП за год:

$$I_{\Delta W_{ПЗ}} = \Delta W_{nc} \cdot C_3, \quad (4.13)$$

$$I_{\Delta W_{ПЗ}} = (568495 + 275940) \cdot 2,32 = 1959 \text{ тыс. руб.}$$

где  $C_3 = 2,32$  руб/кВт·ч - стоимость 1 кВт·ч электроэнергии.

Таблица 4.2 - Результаты расчетов потерь электрической энергии в силовых трансформаторах ГПП ТДН - 10000/35/10

$i$	$S_{Bi}$ , МВА	$T_i$ , ч	$K_{зBi}$	$\Delta W_{кBi}$ , кВт·ч	$\Delta W_{xi}$ , кВт·ч
1	15.672	1000	1.567	122806	31500
2	12.538	3000	1.254	235803	94500
3	11.754	2000	1.175	138157	63000
4	8.620	1000	0.862	37148	31500
5	6.269	1760	0.627	34582	55440
		$\Sigma \Delta W_{кBi} = 568495$		$\Sigma \Delta W_{xi} = 275940$	

Найдем суммарные приведенные затраты:

$$Z_{прив} = E_n \cdot K + I = E_n \cdot K + I_9 + I_{\Delta WПС} \quad (4.14)$$

$$Z_{прив} = 0,25 \cdot 15780 + 1483 + 1959 = 7387 \text{ тыс.руб.}$$

где  $E_n = 0,25$  – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений;

$K = 2 \cdot 7890 = 15780$  тыс.руб. – стоимость силовых трансформаторов ГПП;

$I_9 = P_{\text{сум}} \cdot K = 0,094 \cdot 15780 = 1483$  тыс.руб. – ежегодные отчисления.

4.1.2 Вариант главной понизительной подстанции с силовыми трансформаторами ТДН - 16000/35/10.

Технические характеристики силового трансформатора ТДН - 16000/35/10 приведены в таблице 4.3.

Определим приведенные потери активной и реактивной мощности в стали силового трансформатора на холостом ходу:

$$\Delta P_x' = \Delta P_x + K_{un} \cdot \Delta Q_x, \quad (4.15)$$

$$\Delta P_x' = 17 + 0,05 \cdot 112 = 22,6 \text{ кВт,}$$

Таблица 4.3 - Технические характеристики силового трансформатора ТДН - 16000/35/10

Марка СТ	$S_{ном}$ , МВА	Данные из каталога производителя						Стоимость 1го тр-ра, тыс.руб
		$U_{ном}$ , кВ		$U_{к}$ , %	$\Delta P_{к}$ , кВт	$\Delta P_{x}$ , кВт	$I_{x}$ , %	
		ВН	НН					
ТДН- 16000/35	16	37	10,5	10	85	17	0.7	12618

$$\Delta Q_x = I_{xx\%} + S_{ном.т} / 100, \quad (4.16)$$

$$\Delta Q_x = 0,7 \cdot 16\ 000 / 100 = 112 \text{ квар},$$

$$K_{un} = 0,05 \text{ кВт/квар}.$$

Находим приведенные нагрузочные потери мощности трансформатора:

$$\Delta Q_{к} = u_{к\%} \cdot S_{ном.т} / 100, \quad (4.17)$$

$$\Delta Q_{к} = 10 \cdot 16\ 000 / 100 = 1600 \text{ квар},$$

$$\Delta P'_{к} = \Delta P_{к} + K_{un} \cdot \Delta Q_{к}, \quad (4.18)$$

$$\Delta P'_{к} = 85 + 0,05 \cdot 1600 = 165 \text{ кВт}.$$

Коэффициент загрузки трансформатора:

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

$$K_3 = \frac{15.672}{16} = 0.98.$$

Приведенные потери активной мощности в силовом трансформаторе:

$$P_m = \Delta P'_x + K_3^2 \cdot \Delta P'_к, \quad (4.20)$$

$$P_m = 22.6 + 0.98^2 \cdot 165 = 180.9.$$

На основании суммарного годового графика нагрузки ГПП (рисунок 4.1) определяются потери электроэнергии в трансформаторах ПС  $\Delta W$  и их стоимость  $I_{\Delta W}$ :

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

Результаты расчетов потерь электрической энергии в силовых трансформаторах ГПП ТДН - 16000/35/10 заносим в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 - Результаты расчетов потерь электрической энергии в силовых трансформаторах ГПП ТДН - 16000/35/10

$i$	$S_{Bi}$ , МВА	$T_i$ , ч	$K_{зBi}$	$\Delta W_{кBi}$ , кВт·ч	$\Delta W_{xi}$ , кВт·ч
1	15.672	1000	0.980	79152	45200
2	12.538	3000	0.784	151982	135600
3	11.754	2000	0.735	89046	90400
4	8.620	1000	0.539	23944	45200
5	6.269	1760	0.392	22289	79552
		$\Sigma \Delta W_{кBi} = 366413$		$\Sigma \Delta W_{xi} = 395952$	

По значениям суммарных потерь холостого хода и короткого замыкания находим стоимость потерь электроэнергии в силовом трансформаторе ГПП за год:

$$I_{\Delta WПС} = \Delta W_{nc} \cdot C_9, \quad (4.22)$$

$$I_{\Delta WПС} = (366413 + 395952) \cdot 2,32 = 1768,7 \text{ тыс. руб.}$$

где  $C_9 = 2,32$  руб/кВт·ч - стоимость 1 кВт·ч электроэнергии.

Найдем суммарные приведенные затраты:

$$Z_{\text{прив}} = E_n \cdot K + I = E_n \cdot K + I_3 + I_{\Delta WПC} \quad (4.23)$$

$$Z_{\text{прив}} = 0,25 \cdot 25236 + 2372,2 + 1768,7 = 10449,9 \text{ тыс.руб.}$$

где  $E_n = 0,25$  – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений;

$K = 2 \cdot 12618 = 25236$  тыс.руб. – стоимость силовых трансформаторов ГПП;

$I_3 = P_{\text{сум}} \cdot K = 0,094 \cdot 33000 = 2372,2$  тыс.руб. – ежегодные отчисления.

Так как приведенные затраты на силовые трансформаторы типа ТДН-16000/35/10 значительно превышают затраты на силовые трансформаторы типа ТДН-10000/35/10, то выбираем для дальнейшего рассмотрения и установки на проектируемой подстанции силовые трансформаторы ТДН- 10000/35/10.

## **5 Выбор схемы подстанции**

От ГПП предприятия питаются потребители, относящиеся к первой, второй и третьей категории по надежности электроснабжения, поэтому на ГПП устанавливается два силовых трансформатора в свою очередь получающих питание от двух взаимнорезервирующих линий электропередач 35 кВ [2, 15, 16].

Подстанции по упрощенным схемам в настоящее время широко применяются для электроснабжения производственных и непроизводственных объектов [17]. В зависимости от номинальной мощности трансформаторов подстанции, ее назначения, схемы питания и расстояния от источника питания применяются различные схемы коммутации на первичном напряжении 35-220 кВ. Схемы тупиковых подстанций, выполненных по схеме блока: радиальная линия - силовой трансформатор являются простыми и не нуждаются в установке отделителей, повреждения в силовых трансформаторах не затрагивают работу других подстанций. Такие схемы могут применяться для трансформаторов любой мощности, но только при радиальном питании, когда каждый трансформатор подключается к отдельной линии. Схема подстанции, на которой со стороны высокого напряжения нет вообще коммутационных аппаратов. При возникновении повреждения в трансформаторе импульс от срабатывания защиты передается на головной выключатель, установленный в начале питающей линии. Для ГПП предприятия выбираем схему с силовыми выключателями на стороне высшего напряжения. На вторичном напряжении 10 кВ, применяем одиночную секционированную систему шин. Трансформаторы к секциям подключаются через вводные выключатели, секционный выключатель при нормальном режиме работы отключен.

## 6 Расчет токов короткого замыкания

Существуют следующие основные виды коротких замыканий: трехфазное, когда все три фазы образуют соединение друг с другом; двухфазное – когда две из трех фаз образуют соединение друг с другом, но при этом не соединяются с землей; однофазное – когда одна из трех фаз образует соединение с нейтральной точкой источника питания через землю; двойное замыкание фаз на землю – когда две фазы из трех образуют соединение друг с другом и с землей [18-20].

Короткие замыкания в сети предприятия приводят к: прекращению электроснабжения потребителей электроэнергии, подключенных за местом возникновения КЗ; нарушению нормального функционирования остальных электроприемников, запитанных от неповрежденных участков сети из-за недопустимого снижения напряжения; нарушению нормального режима работы системы электроснабжения всего предприятия.

Для предотвращения появления КЗ и минимизации их последствий могут быть приняты следующие меры: устранение причин, приводящих к КЗ; сокращение времени действия защиты при возникновении КЗ; применение быстродействующих выключателей; правильное определение значений токов КЗ и выбор по ним электрических аппаратов, защит и средств, ограничивающих токи КЗ.

Составляем расчетную схему (рисунок 6.1) для определения токов КЗ и схему замещения (рисунок 6.2).

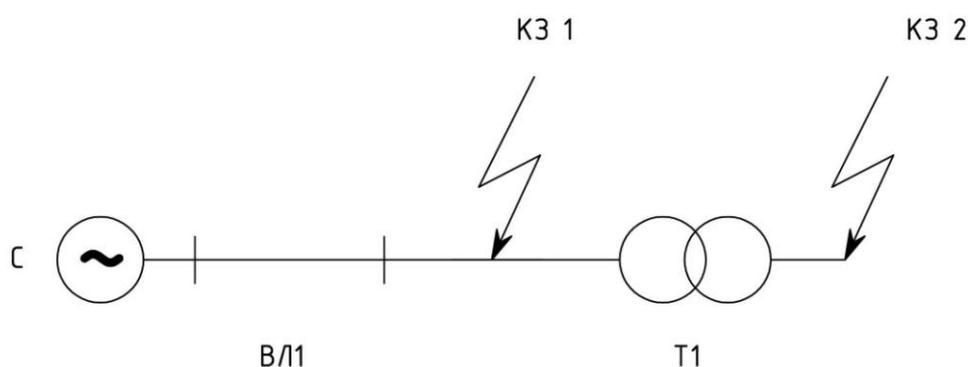


Рисунок 6.1 – Расчетная схема для определения токов КЗ

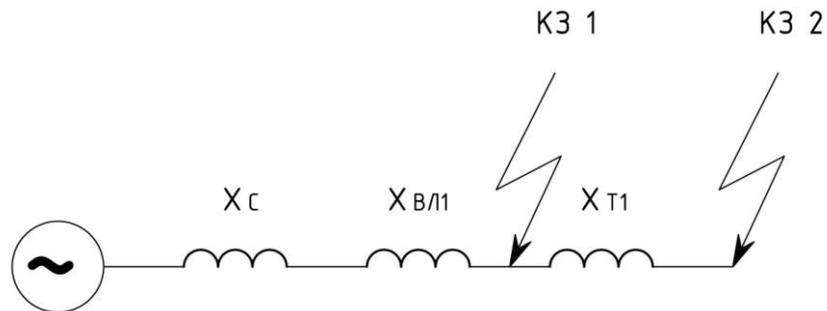


Рисунок 6.2 – Схема замещения для определения токов КЗ

Исходные данные для расчета токов КЗ:

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

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

Параметры силового трансформатора:  $S_H = 10$  МВА;  $U_{\kappa} = 8$  %.

Найдем сопротивление системы:

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

$$x_{c.\delta} = \frac{1000}{1000} = 1.$$

Найдем сопротивление воздушной линии:

$$x_{ВЛ.\delta} = \frac{x_{y\delta}}{2} \cdot L \cdot \frac{S_{\sigma}}{U_{сн}^2}; \quad (6.2)$$

$$x_{ВЛ.\delta} = \frac{0.4}{2} \cdot 4 \cdot \frac{1000}{37^2} = 0.584.$$

Найдем сопротивление силового трансформатора:

$$x_{T.\delta} = \frac{U_{\kappa}, \%}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_H}; \quad (6.3)$$

$$x_{T.\delta} = \frac{8}{100} \cdot \frac{1000}{10} = 8.$$

Найдем результирующее сопротивление в точке К1:

$$x_{рез1} = x_{c.\delta} + x_{BII.\delta}; \quad (6.4)$$

$$x_{рез1} = 1 + 0.584 = 1.584.$$

Найдем базисный ток в точке К1:

$$I_{\delta.k1} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{сн}}; \quad (6.5)$$

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

Найдем начальное действующее значение тока трехфазного тока КЗ в точке К1:

$$I_{к1}^3 = \frac{E_{\delta}^{\wedge}}{x_{рез1}} \cdot I_{\delta}; \quad (6.6)$$

$$I_{к1}^3 = \frac{1}{1.584} \cdot 15.604 = 9.849 \text{ кА};$$

Найдем ударный ток КЗ в точке К1:

$$i_{y\delta.k1} = \sqrt{2} \cdot I_{n,o}^3 \cdot \kappa_{y\delta}; \quad (6.7)$$

$$i_{y\delta.k1} = \sqrt{2} \cdot 9.849 \cdot 1.8 = 25.071 \text{ кА}.$$

Найдем результирующее сопротивление в точке К2:

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

$$x_{pez2} = 1.584 + 8 = 9.584.$$

Найдем базисный ток в точке К2:

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

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

Найдем начальное действующее значение тока трехфазного тока К3 в точке К2:

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

$$I_{к2}^3 = \frac{1}{9.584} \cdot 54.986 = 5.737 \text{ кА};$$

Найдем ударный ток К3 в точке К2:

$$i_{y\delta,к2} = \sqrt{2} \cdot I_{n,o}^3 \cdot K_{y\delta}; \quad (6.11)$$

$$i_{y\delta,к2} = \sqrt{2} \cdot 5.737 \cdot 1.85 = 15.01 \text{ кА}.$$

Полученные результаты сведем в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты расчетов токов К3

	$U_{сн}, \text{кВ}$	$K_{y\delta}$	$I_{к}^{\ominus}, \text{кА}$	$i_{y\delta}, \text{кА}$
К1	37	1.8	9.8	25.1
К2	10.5	1.85	5.7	15

## 7 Расчет и выбор электрического оборудования и проводников

### 7.1 Выбор электрического оборудования на стороне высокого напряжения 35 кВ

#### 7.1.1 Выбор высоковольтного выключателя

На стороне 35 кВ предварительно выбираем высоковольтный выключатель ВВН-СЭЩ-П-35-25/1000 УХЛ1.

Высоковольтный выключатель выбирается и проверяется по:

- номинальному напряжению:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (7.1)$$
$$35 \text{ кВ} \leq 35 \text{ кВ};$$

- номинальному току:

$$I_{max} < I_n, \quad (7.2)$$
$$218 \text{ А} < 1000 \text{ А},$$

где

$$I_{max} = 1.4 \cdot \frac{S_{н.г}}{\sqrt{3} \cdot U_{сн}}, \quad (7.3)$$
$$I_{max} = 1.4 \cdot \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 37} = 218 \text{ А};$$

- по отключающей способности:

$$I_{к1} \leq I_{откл.н}, \quad (7.4)$$
$$9.8 \text{ кА} \leq 25 \text{ кА},$$

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

$$5.1 \text{ кА} \leq 12.4 \text{ кА},$$

где

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

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot 9.8 \cdot e^{\frac{-0.05}{0.05}} = 5.1 \text{ кА},$$

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

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

- по предельному сквозному току КЗ:

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

$$9.8 \text{ кА} \leq 25 \text{ кА};$$

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

$$25.1 \text{ кА} \leq 63 \text{ кА};$$

- по значению теплового импульса:

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

$$14.4 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 62.5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

Выбранный высоковольтный выключатель ВВН-СЭЦ-П-35-25/1000 УХЛ1 прошел проверку.

### 7.1.2 Выбор разъединителя

Разъединитель выбирается и проверяется по тем же параметрам, что и

высоковольтный выключатель, за исключением отключающей способности.

Предварительно выбираем разъединитель типа РГП-СЭЩ-35/1000 УХЛ1.

Разъединитель выбирается и проверяется по:

- номинальному напряжению:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (7.11)$$
$$35 \text{ кВ} \leq 35 \text{ кВ};$$

- номинальному току:

$$I_{max} < I_n, \quad (7.12)$$
$$218 \text{ А} < 1000 \text{ А},$$

- по предельному сквозному току КЗ:

$$i_{yd} \leq i_{np.c}, \quad (7.13)$$
$$25.1 \text{ кА} \leq 50 \text{ кА};$$

- по значению теплового импульса:

$$B_k \leq I_{np.c}^2 \cdot t_{np.c}, \quad (7.14)$$
$$14.4 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 40 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Выбранный разъединитель РГП-СЭЩ-35/1000 УХЛ1 прошел проверку.

### 8.1.3 Выбор трансформатора тока

На стороне 35 кВ предварительно выбираем трансформатор тока типа ТВ-СЭЩ-35-300/5 О4.

Трансформатор тока выбираем и проверяем по следующим условиям:

- номинальному напряжению:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (7.15)$$

$$35 \text{ кВ} \leq 35 \text{ кВ};$$

- номинальному току:

$$I_{\max} \leq I_{Н.ТТ}, \quad (7.16)$$

$$218 \text{ А} \leq 300 \text{ А};$$

- электродинамической стойкости:

$$i_{уд} \leq i_{электр.ст}, \quad (7.17)$$

$$25.1 \text{ кА} \leq 50 \text{ кА};$$

- термической стойкости:

$$B_k \leq K_T^2 \cdot I_{1ном.}^2 \cdot t_{откл} = I_T^2 \cdot t_{откл}, \quad (7.18)$$

$$14.4 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 62.5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

- вторичной нагрузке:

$$Z_2 \leq Z_{2ном}, \quad (7.19)$$

Принимаем  $Z_2 \approx R_2$

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

Для нахождения  $R_{\text{приб}}$  необходимо определить нагрузку по фазам трансформатора тока  $S_{\text{приб}}$  и принять за расчетную наиболее загруженную фазу.

Вторичной нагрузкой трансформатора тока является амперметр с максимальной мощностью 0.1 ВА. Найдем сопротивление прибора:

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

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

Тогда допустимое сопротивление проводов:

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

$$R_{\text{пр}} = 1 - 0.004 - 0.1 = 1.096 \text{ Ом}.$$

Найдем минимальное сечение соединительных медных проводов:

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

$$s = \frac{0.0175 \cdot 65}{1.096} = 1.038 \text{ мм}^2.$$

По условию механической прочности сечение медных жил должно быть не менее  $2.5 \text{ мм}^2$ , поэтому принимаем стандартное сечение жилы  $2.5 \text{ мм}^2$ .

Выбранный трансформатор тока ТВ-СЭЦ-35-300/5 О4 прошел проверку.

#### 7.1.4 Выбор гибких шин

Гибкие шины на напряжение 35 кВ выполняются сталеалюминиевыми проводами марки АС.

Найдем сечение проводов:

$$s = \frac{I_{\max}}{j_9}; \quad (7.23)$$

$$s = \frac{156}{1.1} = 142 \text{ мм}^2.$$

Выбираем провод типа АС-150/24 мм<sup>2</sup> с длительно допустимым током провода 450 А.

Найдем максимальное значение критической напряженности электрического поля:

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

$$E_0 = 30.3 \cdot 0.82 \cdot \left( 1 + \frac{0.299}{\sqrt{0.855}} \right) = 32.9 \text{ кВ/м.}$$

Найдем напряженность около провода:

$$E = \frac{0.354 \cdot U_n}{r_o \cdot \lg \frac{1.26 \cdot D}{r_o}}; \quad (7.25)$$

$$E = \frac{0.354 \cdot 37}{0.855 \cdot \lg \frac{1.26 \cdot 150}{0.855}} = 6.5 \text{ кВ/м.}$$

Условие отсутствия короны:

$$1.07E \leq 0.9E_0; \quad (7.26)$$

$$7 \text{ кВ/м} < 29.6 \text{ кВ/м.}$$

Провод АС-150/24 прошел проверку.

## 7.2 Выбор электрического оборудования на стороне низкого напряжения 10 кВ

### 7.2.1 Выбор высоковольтного выключателя

На стороне 10 кВ предварительно выбираем высоковольтный выключатель ВВУ-СЭЦ-10-20/1000.

Высоковольтный выключатель выбирается и проверяется по:

- номинальному напряжению:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (7.27)$$
$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- номинальному току:

$$I_{max} < I_n, \quad (7.28)$$
$$770 \text{ А} < 1000 \text{ А},$$

где

$$I_{max} = 1.4 \cdot \frac{S_{н.т}}{\sqrt{3} \cdot U_{сн}}, \quad (7.29)$$
$$I_{max} = 1.4 \cdot \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 10.5} = 770 \text{ А};$$

- по отключающей способности:

$$I_{к1} \leq I_{откл.н}, \quad (7.30)$$
$$5.7 \text{ кА} \leq 20 \text{ кА},$$

$$i_{a,\tau} \leq i_{a.н}, \quad (7.31)$$
$$4.1 \text{ кА} \leq 8.5 \text{ кА},$$

где

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

$$i_{a.\tau} = \sqrt{2} \cdot 5.7 \cdot e^{\frac{-0.04}{0.06}} = 4.1 \text{ кА},$$

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

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

- по предельному сквозному току КЗ:

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

$$5.7 \text{ кА} \leq 20 \text{ кА};$$

$$i_{уд} \leq i_{нр.с.}, \quad (7.35)$$

$$15 \text{ кА} \leq 50 \text{ кА};$$

- по значению теплового импульса:

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

$$4.9 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 36 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Выбранный высоковольтный выключатель ВВУ-СЭЦ-10-20/1000 прошел проверку.

### 7.2.2 Выбор трансформатора тока

На стороне 10 кВ предварительно выбираем трансформатор тока типа ТОЛ-СЭЦ-10-1000/5.

Трансформатор тока выбираем и проверяем по следующим условиям:

- номинальному напряжению:

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

- номинальному току:

$$I_{\max} \leq I_{Н.ТТ}, \quad (7.38)$$
$$770 \text{ А} \leq 800 \text{ А};$$

- электродинамической стойкости:

$$i_{уд} \leq i_{эдин.ст}, \quad (7.39)$$
$$15 \text{ кА} \leq 100 \text{ кА};$$

- термической стойкости:

$$B_k \leq K_T^2 \cdot I_{1ном.}^2 \cdot t_{откл} = I_T^2 \cdot t_{откл}, \quad (7.40)$$
$$4.9 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 144 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

- вторичной нагрузке:

$$Z_2 \leq Z_{2ном}, \quad (7.41)$$

Принимаем  $Z_2 \approx R_2$

$$R_2 = R_{приб} + R_{пр} + R_k, \quad (7.42)$$

Для нахождения  $R_{приб}$  необходимо определить нагрузку по фазам трансформатора тока  $S_{приб}$  и принять за расчетную наиболее загруженную фазу.

Вторичной нагрузкой трансформатора тока являются амперметр, счетчик активной и реактивной энергии с суммарной максимальной мощностью 6 ВА. Найдем сопротивление прибора:

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

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

Тогда допустимое сопротивление проводов:

$$R_{пр} = Z_{2ном} - R_{приб} - R_k,$$
$$R_{пр} = 1.2 - 0.24 - 0.1 = 0.86 \text{ Ом}.$$

Найдем минимальное сечение соединительных медных проводов:

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

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

По условию механической прочности сечение медных жил должно быть не менее  $2.5 \text{ мм}^2$ , поэтому принимаем стандартное сечение жилы  $2.5 \text{ мм}^2$ .

Выбранный трансформатор тока ТОЛ-СЭЩ-10-1000/5 прошел проверку.

Аналогичным образом выбираем и проверяем трансформаторы тока на отходящих линиях.

### 7.2.3 Выбор трансформатора напряжения

Измерительный трансформатор напряжения выбираем по:

- номинальному напряжению:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (7.45)$$

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- по классу точности;

- по величине вторичной нагрузки:

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

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

На стороне 10 кВ выбираем трансформатор напряжения ЗНОЛ-СЭЦ-10 с классом точности 0.5. В комплекте с ТН идет предохранитель ПКТ-101-10. К ТН подключается вольтметр и счетчики активной и реактивной электроэнергии с суммарной потребляемой мощностью 108 ВА.

Тогда:

$$108 \text{ ВА} \leq 225 \text{ ВА}.$$

Выбранный трансформатор напряжения ЗНОЛ-СЭЦ-10 прошел проверку.

### 7.2.4 Выбор жестких шин

Выбираем жесткие шины по экономической плотности тока:

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

$$s = \frac{550}{1.1} = 500 \text{ мм}^2.$$

Выбираем алюминиевые прямоугольные шины сечением 60x10 мм, с длительно допустимым током 1155 А.

Найдем минимально допустимое сечение шины по термической стойкости:

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

$$s_{\min} = \frac{\sqrt{4.9} \cdot 10^3}{66} = 33.5 \text{ мм}^2.$$

Найдем максимальную силу, действующую на проводники при трехфазном КЗ:

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

$$F_{\max}^3 = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{1} \cdot 2 \cdot 15000^2 \cdot 1 \cdot 1 = 77.9 \text{ Н}.$$

Найдем момент сопротивления поперечного сечения шины:

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

$$W = \frac{0.01 \cdot 0.06^2}{6} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Определим максимальное напряжение в материале шины:

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}^3 \cdot l}{\lambda \cdot W}, \quad (7.52)$$
$$\sigma_{\max} = \frac{77.9 \cdot 2}{8 \cdot 6 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-6} = 3.2 \text{ МПа}.$$

Условие проверки на электродинамическую стойкость:

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{доп}}, \quad (7.53)$$
$$3.2 \text{ МПа} \leq 247.1 \text{ МПа},$$

где

$$\sigma_{\text{доп}} = 0.7 \cdot \sigma_p, \quad (7.54)$$
$$\sigma_{\text{доп}} = 0.7 \cdot 353 = 247.1 \text{ МПа}.$$

Определим момент инерции поперечного сечения шины:

$$J = \frac{b \cdot h^3}{12}, \quad (7.55)$$
$$J = \frac{0.01 \cdot 0.06^3}{12} = 1.8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4.$$

Определим частоту собственных колебаний:

$$f_0 = \frac{r_1^2}{2 \cdot \pi \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m}}; \quad (7.56)$$
$$f_0 = \frac{3.14^2}{2 \cdot \pi \cdot 2^2} \cdot \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 1.8 \cdot 10^{-7}}{2.5}} = 27.9 \text{ Гц}.$$

Т.к. частота собственных колебаний меньше 30 Гц, то механический

резонанс не появляется.

### 7.2.5 Выбор опорных изоляторов

Опорные изоляторы необходимы для крепления шин. Выбираем изолятор типа ИОР-10-3.75 II УХЛ.

Опорные изоляторы выбираем и проверяем по параметрам:

- номинальному напряжению:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (7.57)$$

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- по максимально допустимой нагрузке на головку изолятора:

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

$$77.9 \text{ Н} < 1687.5 \text{ Н},$$

где

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

$$F_{доп} = 0.6 \cdot 3750 \cdot \frac{0.12}{0.16} = 1687.5 \text{ Н}.$$

где

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

$$H = 0.12 + 0.01 + \frac{0.06}{2} = 0.16.$$

Опорный изолятор ИОР-10-3.75 II УХЛ прошел проверку.

### 7.2.6 Выбор проходных изоляторов

Выбираем проходной изолятор типа ИП-10/1000-7,5 УХЛ2.

Проходные изоляторы выбираем и проверяем по параметрам:

- номинальному напряжению:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (7.61)$$
$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- номинальному току:

$$I_{max} < I_n, \quad (7.62)$$
$$770 \text{ А} < 1000 \text{ А};$$

- по максимально допустимой нагрузке на головку изолятора:

$$F_{расч} \leq 0.6 \cdot F_{разр}, \quad (7.63)$$
$$22.5 \text{ Н} < 4500 \text{ Н},$$

где

$$F_{расч} = 0.5 \cdot \frac{i_{уд}^2}{a} \cdot l_{из} \cdot 10^{-7}, \quad (7.64)$$
$$F_{расч} = 0.5 \cdot \frac{15000^2}{1} \cdot 2 \cdot 10^{-7} = 22.5 \text{ Н}.$$

Проходной изолятор ИП-10/1000-7,5 УХЛ2 прошел проверку.

## 8 Расчет заземления подстанции

Характеристикой электробезопасности является предельно допустимое значение напряжения прикосновения, которое должно быть обеспечено при всех условиях эксплуатации объекта [21].

В качестве заземлителей выбираем металлический уголок 60х60х5 мм длиной 3 м каждый. Заземлители забиваются на глубину 0.7 м с шагом 6 м. Предварительное число вертикальных заземлителей – 32 шт. Вертикальные заземлители соединяются стальной полосой 40х5 мм. Удельное сопротивление грунта – 70 Ом·м.

Найдем допустимое сопротивление заземляющего устройства (ЗУ):

$$R_{доп} = \frac{\rho_{грунт}}{100} \cdot R_3, \quad (8.1)$$

$$R_{доп} = \frac{70}{100} \cdot 4 = 2.8 \text{ Ом.}$$

Найдем сопротивление растекания вертикального заземлителя:

$$R_g = 0.298 \cdot \rho_{p.v.} \cdot \kappa_c, \quad (8.2)$$

$$R_g = 0.298 \cdot 105 \cdot 1.5 = 46.9 \text{ Ом,}$$

где

$$\rho_{p.v.} = \kappa_c \cdot \rho_{грунт}, \quad (8.3)$$

$$\rho_{p.v.} = 1.5 \cdot 70 = 105 \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

Найдем общее количество вертикальных заземлителей:

$$n_g = \frac{R_g}{\eta_g \cdot R_{доп}}, \quad (8.4)$$

$$n_6 = \frac{46.9}{0.61 \cdot 2.8} = 27 \text{ шт.}$$

Найдем длину горизонтального заземлителя:

$$l_2 = a \cdot n_6, \quad (8.5)$$

$$l_2 = 6 \cdot 27 = 162 \text{ м.}$$

Найдем сопротивление растеканию горизонтального заземлителя:

$$R_2 = \frac{0.366 \cdot \rho_{p.z.}}{l_2} \cdot \lg \frac{2l_2^2}{b \cdot t_0}, \quad (8.6)$$

$$R_2 = \frac{0.366 \cdot 280}{162} \cdot \lg \frac{2 \cdot 162^2}{0.04 \cdot 0.7} = 4 \text{ Ом,}$$

где

$$\rho_{p.z.} = \kappa_c \cdot \rho_{\text{грунт}}, \quad (8.7)$$

$$\rho_{p.z.} = 7 \cdot 70 = 280 \text{ Ом.}$$

Найдем уточненное сопротивление растеканию горизонтального заземлителя:

$$R_2' = \frac{R_2}{\eta_2}, \quad (8.8)$$

$$R_2' = \frac{4}{0.3} = 13.2 \text{ Ом.}$$

Найдем уточненное сопротивление растеканию вертикальных заземлителей:

$$R_{\epsilon}^{\cdot} = \frac{R_{\epsilon}^{\cdot} \cdot R_{\text{дон}}}{R_{\epsilon}^{\cdot} - R_{\text{дон}}}, \quad (8.9)$$

$$R_{\epsilon}^{\cdot} = \frac{13.2 \cdot 2.8}{13.2 - 2.8} = 3.6 \text{ Ом.}$$

Найдем уточненное количество вертикальных заземлителей:

$$n_{\epsilon}^{\cdot} = \frac{R_{\epsilon}^{\cdot}}{\eta_{\epsilon} \cdot R_{\epsilon}^{\cdot}}, \quad (8.10)$$

$$n_{\epsilon} = \frac{46.9}{0.61 \cdot 3.6} \approx 22 \text{ шт.}$$

Окончательно принимаем 22 вертикальных заземлителя.

## Заключение

В выпускной квалификационной работе бакалавра определена силовая электрическая нагрузка и нагрузка освещения завода по производству насосного и воздуходувного оборудования. Суммарная расчётная нагрузка с учетом компенсации реактивной мощности составила  $S_p = 15,7$  МВА.

Были выбраны мощности цеховых КТП с учетом компенсации реактивной мощности. Всего к установке на предприятии принято 18 КТП с силовыми трансформаторами мощностью от 250 до 1600 кВА.

Определено рациональное напряжение питания предприятия и произведено технико-экономическое обоснование оптимальной номинальной мощности силовых трансформаторов ГПП, в результате которого к установке приняты трансформаторы ТДН-10000/35/10.

Выполнены расчет токов короткого замыкания, выбор и проверка основных электрических аппаратов на ГПП.

Произведен расчет заземления главной понизительной подстанции.

## Список использованных источников

1. Правила устройства электроустановок. Раздел 6. Электрическое освещение. Раздел 7. Электрооборудование специальных установок. - 7-е изд. - Москва: Изд-во НЦ ЭНАС, 2014.
2. Сивков, А.А. Основы электроснабжения. Учебное пособие / А.А. Сивков, Д.Ю. Герасимов, А.С. Сайгаш – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014.
3. Вахнина, В.В. Системы электроснабжения. Электрон. учеб.-метод. пособие / В.В. Вахнина, А.Н. Черненко - Тольятти: ТГУ, 2015.
4. Вахнина, В.В. Проектирование систем электроснабжения. Электрон. учеб.-метод. пособие / В.В. Вахнина, А.Н. Черненко - Тольятти: ТГУ, 2016.
5. Юндин, М.А. Курсовое и дипломное проектирование по электроснабжению: учеб. пособие / М.А. Юндин, А.М. Королев. - Изд. 2-е, испр. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2014.
6. Анчарова, Т.В. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений. Учебник / Т.В. Анчарова, М.А. Рашевская, Е.Д. Стебунова – Москва: Форум, 2014.
7. Liu, H. The Control and Analysis of Self-Healing Urban Power Grid / H. Liu, X. Chen, K. Yu, Y. Hou. - Smart Grid, IEEE Transactions on, pp. 1119 – 1129, Volume 3, Issue 3, 2013.
8. Щербаков, Е.Ф. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях. Учебное пособие / Е.Ф. Щербаков – Москва: Форум, 2014.
9. Шлейников, В.Б. Электроснабжение силовых электроприемников цеха промышленного предприятия: учеб. пособие / В.Б. Шлейников, Т.В. Сазонова. - Оренбург : ОГУ, 2013.
10. Электроснабжение: выбор и проверка токоведущих частей и коммутационных аппаратов: метод. указания к практ. и курсов. работам / Липецкий государственный технический университет ; сост. Т.В. Синюкова. - Липецк: ЛГТУ, 2014.

11. Chapman, S.J. Instructor's Manual to accompany Electric Machinery and Power System Fundamentals, Second Edition / S.J. Chapman – USA: McGraw-Hill, 2013.
12. Сибикин, Ю.Д. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. Учебное пособие / Ю.Д. Сибикин – Москва: Форум, 2015.
13. Электроснабжение: методические указания к курсовой работе для студентов очной и очно-заочной форм обучения / сост. Т. В. Синюкова. - Липецк: ЛГТУ, 2013.
14. Sharma, A. Time latency compensation for wide area damping controller / A. Sharma, B. Sahu. - Power India International Conference (PIICON), 2014 6th IEEE, pp. 1 – 6.
15. Старшинов, В.А. Электрическая часть электростанций и подстанций. Учебное пособие / В.А. Старшинов, М.В. Пираторов, М.А. Козина. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015.
16. Шеховцов, В.П. Расчет и проектирование ОУ и электроустановок промышленных механизмов. Учебное пособие / В.П. Шеховцов – М.: Форум, Инфра-М, 2015.
17. Zhang, P. Next-Generation Monitoring, Analysis, and Control for the Future Smart Control Center / P. Zhang, F. Li, N. Bhatt. - Smart Grid, IEEE Transactions on, pp. 186 – 192, Volume 1, Issue 2, 2010.
18. Стрельников, Н.А. Электроснабжение промышленных предприятий: учеб. пособие / Н.А. Стрельников. - Новосибирск : НГТУ, 2013.
19. Электроснабжение: расчет токов короткого замыкания: метод. указания к практ. и курсов. работам / Липецкий государственный технический университет; сост. Т. В. Синюкова. - Липецк: ЛГТУ, 2014.
20. IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems. IEEE Std 551. – NY: IEEE, 2013.
21. Борисов, Р. К. Заземляющие устройства электроустановок. Справочник / Р. К. Борисов, А. В. Горшков, Ю. В. Жарков - Москва: МЭИ, 2013.