

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

Институт энергетики и электротехники

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электроснабжение
(направленность (профиль)/специализация)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему «Электроснабжение машиностроительного завода АО «ДемМЗ»

Студент	<u>Д.С. Кашин</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Руководитель	<u>В.П. Тараканов</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Консультанты	_____	_____	(личная подпись)
	_____	_____	(личная подпись)

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« ____ » _____ 2017 г.

Тольятти 2017

Аннотация

Бакалаврская работа выполнена на тему «Электроснабжение машиностроительного завода АО «ДемМЗ»».

В выпускной квалификационной работе (ВКР) выполнены расчеты нагрузок силовых электроприемников для каждого из цехов промышленного предприятия, выполнен выбор цеховых трансформаторов с учетом компенсации реактивной мощности и количества устанавливаемых комплектных трансформаторных подстанций (КТП), выполнено технико-экономическое сравнение и выбор мощности силовых трансформаторов главной понизительной подстанции (ГПП), определено значение оптимального напряжения питания промышленного предприятия, рассчитаны токи КЗ; выбрано и проверено на стойкость к токам КЗ основное оборудование главной понизительной подстанции, произведен расчет заземления главной понизительной подстанции.

ВКР бакалавра выполнена на 56 листах и содержит 8 таблиц и 7 рисунков. Пояснительная записка дополняется шестью чертежами формата А1.

Содержание

Введение	4
1 Характеристика объекта проектирования	5
2 Расчет электрических нагрузок	8
3 Выбор типа, числа и мощности трансформаторов цеховых подстанций	12
4 Выбор типа, числа и мощности трансформаторов ГПП	21
5 Выбор схемы подстанции	31
6 Расчёт токов короткого замыкания	32
7 Расчет и выбор электрического оборудования и проводников	36
8 Расчет заземления подстанции	51
Заключение	54
Список использованных источников	55

Введение

Электроэнергетическая отрасль является критической в плане жизнеобеспечения отраслью промышленности и обладает своими особенностями функционирования, которые отличают ее от остальных отраслей промышленности [1-5].

Первой особенностью электроэнергетики является неразрывность и малое время между процессами производства, распределения и потребления электроэнергии.

Второй особенностью является относительно высокая скорость протекания переходных процессов в системе электроснабжения. Переходные процессы могут происходить в тысячные доли секунды. Эти процессы вызваны короткими замыканиями (КЗ), включениями и отключениями оборудования, резкими изменениями нагрузки, нарушениями устойчивости в электроэнергосистеме.

Третьей особенностью является обеспечение ЭЭ всех отраслей промышленности, которые различаются применяемой технологией производства продукции, используемыми методами преобразования электроэнергии в другие виды энергии и широким разнообразием применяемых ЭП.

Целью ВКР является разработка надежной и экономичной системы электроснабжения машиностроительного завода АО «ДемМЗ», позволяющей обеспечить соблюдение требований к качеству электрической энергии, установленных в ГОСТ 32144-2013 [6, 7].

1 Характеристика объекта проектирования

Демиховский машиностроительный завод более 20 лет производит элементы для моторвагонного подвижного состава.

АО «ДемМЗ» производит:

- запасные части (токоприемники (рисунок 1.1), резервуары, поглощающие аппараты и другие комплектующие для моторвагонного подвижного состава);



Рисунок 1.1 – Внешний вид токоприемника

- колесные пары (для вагонов метро 760 серии (рисунок 1.2) и колесные пары для вагонов рельсовых автобусов);



Рисунок 1.2 – Внешний вид колесной пары

- эскалаторы (зоны (Б, Бн, И, Б0), ступени (рисунок 1.3), тяговые цепи, подъемно-транспортное оборудование для машинного зала)



Рисунок 1.3 – Внешний вид узлов и деталей для эскалаторов

- моторные тележки (рисунок 1.4) для подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. Моторные тележки предназначены для установки на вагоны электропоездов.



Рисунок 1.4 – Внешний вид моторной тележки

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	Кузнечно-прессовый цех	14415	139
2	Термический цех	5272	23
3	Сталелитейный цех	9794	79
4	Обрубочный цех	11216	35
5	Формовочный цех	8991	36
6	Чугунно-литейный цех	8300	23
7	Ремонтно-механический цех	678	71
8	Ремонтно-строительный цех	1031	21
9	Модельный цех	2562	137
10	Копровый цех	2580	22

Перечень высоковольтных электроприемников предприятия приведен в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Перечень высоковольтных электроприемников

№ п/п	Наименование цеха, отделения, участка	Вид высоковольтных электроприемников	Установленная мощность одного электроприемника, кВт	Кол-во электроприемников	Напряжение электроприемников, кВ
3	Сталелитейный цех	Электрические печи	5500	4	10

2 Расчет электрических нагрузок

Расчет электрических нагрузок производится по уровням систем электроснабжения [2, 8-11]. Всего различают шесть уровней системы электроснабжения промышленного предприятия.

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_H , кВт	$P_{H.э.}$, 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
Нагрузка 0,4 кВ													
1	Кузнечно-прессовый цех	14415	103.71	139	0.35	0.55	1.52	5045.3	7661.12	0.7	3531.68	7661.12	8435.96
2	Термический цех	5272	229.22	23	0.45	0.75	0.88	2372.4	2092.26	0.85	2016.54	2092.26	2905.85
3	Сталелитейный цех	9794	123.97	79	0.4	0.7	1.02	3917.6	3996.75	0.7	2742.32	3996.75	4847.10
4	Обрубочный цех	11216	320.46	35	0.3	0.75	0.88	3364.8	2967.47	0.75	2523.60	3264.22	4125.98
5	Формовочный цех	8991	249.75	36	0.5	0.8	0.75	4495.5	3371.63	0.8	3596.40	3371.63	4929.70
6	Чугунно-литейный цех	8300	360.87	23	0.6	0.8	0.75	4980	3735.00	0.9	4482.00	4108.50	6080.14
7	Ремонтно-механический цех	678	9.55	71	0.35	0.55	1.52	237.3	360.34	0.7	166.11	396.37	429.77

Продолжение таблицы 2.1

№	Название цеха	P_H , кВт	$P_{H.э.}$, 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
8	Ремонтно-строительный цех	1031	49.10	21	0.35	0.55	1.52	360.85	547.94	0.85	306.72	602.74	676.29
9	Модельный цех	2562	18.70	137	0.7	0.85	0.62	1793.4	1111.45	0.8	1434.72	1222.59	1884.98
10	Копровый цех	2580	117.27	22	0.2	0.7	1.02	516	526.43	0.8	412.80	526.43	668.97
	Итого по нагрузке 0,4 кВ	64839	9,6...360,9	586	0.42	-	0.97	27083	26370.38	-	21212.89	27242.60	34527.47
Нагрузка 10 кВ													
3	Сталелитейный цех (Электрические печи)	22000	5500	4	0.5	0.85	0.62	11000	6817.19	1.04	11440	6817.19	13317.19
	Всего	86839	9,6...5500	590	0.44	-	0.87	38083	33187.57	-	32652.89	34059.79	47183.48

3 Выбор типа, числа и мощности трансформаторов цеховых подстанций

При запасе на складе силовых трансформаторов или при наличии связей со стороны вторичного напряжения надежность электроснабжение потребителей II и III категории обеспечивают однотрансформаторные подстанции [2, 12-14].

Если преобладают потребители I и II категорий, то используют двухтрансформаторные подстанции.

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-строительного цеха

Определяем мощность трансформаторов

$$S_{HT} > \frac{P_{p\Sigma}}{K_3 N_T}, \quad (3.3)$$

$$S_{HT} > \frac{306.7}{0,8 \cdot 2} = 192 \text{ кВА},$$

где $K_3 = 0,8$.

Принимаем ближайшее большее значение номинальной мощности трансформатора $S_{HT} = 250$ кВА.

3.1.1 Вариант А

По справочным таблицам каталогов производителей находим $\Delta P_{xx} = 0.55$ кВт ; $\Delta P_{кз} = 3.1$ квар; $i_{xx} = 2.3\%$; $u_{кз} = 4.5\%$, $K_T = 146.7$ тыс. руб.

Найдем величину потерь мощности в трансформаторах:

$$\Delta P_{mp} = N_T \cdot (P_{xx} + K_3^2 \cdot P_{кз}), \quad (3.4)$$

$$\Delta P_{mp} = 2 \cdot (0.55 + 0.8^2 \cdot 3.1) = 5.07 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_{mp} = N_T \cdot (i_0 + K_3^2 \cdot U_{кз}) \cdot \frac{S_H}{100}, \quad (3.5)$$

$$\Delta Q_{mp} = 2 \cdot (2.3 + 0.8^2 \cdot 4.5) \cdot \frac{250}{100} = 25.9 \text{ квар},$$

Найдем расчетную нагрузку по цеху с учетом потерь мощности в силовых трансформаторах:

$$P_P = P_{p\Sigma} + n_m \cdot \Delta P_{mp}, \quad (3.6)$$

$$P_P = 306.7 + 2 \cdot 5.07 = 316.9 \text{ кВт},$$

$$Q_P = Q_{p\Sigma} + n_m \cdot \Delta Q_{mp}, \quad (3.7)$$

$$Q_P = 602.7 + 2 \cdot 25.9 = 654.5 \text{ квар},$$

$$Q_{\min} = 0,7 \cdot Q_P, \quad (3.8)$$

$$Q_{\min} = 0,7 \cdot 654.5 = 458.2 \text{ квар}.$$

1. Определим значения входных реактивных мощностей:

$$\text{а) } Q'_{\text{э1}} = Q_P - 0,7 Q_{\text{сд}}, \quad (3.9)$$

$$Q'_{\text{э1}} = 654.5 - 0,7 \cdot 0 = 654.5 \text{ квар};$$

$$Q''_{\text{э1}} = \alpha P_P, \quad (3.10)$$

$$Q''_{\text{э1}} = 0,28 \cdot 316.9 = 88.7 \text{ квар}.$$

Из найденных значений принимаем наименьшее: $Q_{\text{э1}} = 88.7 \text{ квар}$.

$$\text{б) } Q_{\text{э2,в}} = Q_{\min} - Q_{\text{кд}} = Q_{\min} - (Q_P - Q_{\text{э1}}), \quad (3.11)$$

$$Q_{\text{э2,в}} = 458.2 - (654.5 - 88.7) = -107.6 \text{ квар};$$

$$Q_{\text{э2,н}} = Q_{\min} + Q_{\text{к}}, \quad (3.12)$$

$$Q_{\text{э2,н}} = 458.2 + 0 = 458.2 \text{ квар};$$

$$Q_{\text{к}} = 0.$$

Так как в часы минимальных нагрузок напряжение будет повышенным, то $Q_{\text{э2}} = Q_{\text{э2,н}} = 458.2 \text{ квар}$.

2. Найдем суммарную мощность КУ:

$$Q_{\text{ку,макс}} = 1,15 \cdot Q_P - Q_{\text{э1}}, \quad (3.13)$$

$$Q_{куmax} = 1,15 \cdot 654,5 - 88,7 = 664 \text{ квар.}$$

При этом мощность конденсаторных установок без ступеней регулирования:

$$Q_{куmin} = Q_{min} - Q_{э2}, \quad (3.15)$$

$$Q_{куmin} = 458,2 - 458,2 = 0.$$

Таким образом, все установки должны быть регулируемы.

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

$$Q_{эH} = Q_{э1} - (Q_p - Q_{p\Sigma}), \quad (3.16)$$

$$Q_{эH} = 88,7 - (654,5 - 602,7) = 36,9 \text{ квар.}$$

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

$$Q_T = \sqrt{(N_T K_3 S_H)^2 - P_{p\Sigma}^2}, \quad (3.17)$$

$$Q_T = \sqrt{(2 \cdot 0,8 \cdot 250)^2 - 306,7^2} = 256,8 \text{ квар,}$$

$$Q_{KVH} = Q_{p\Sigma} - Q_T, \quad (3.18)$$

$$Q_{KVH} = 602,7 - 256,8 = 346 \text{ квар,}$$

$$Q_{.KVB} = Q_{KV \max} - Q_{KVH}, \quad (3.19)$$

$$Q_{.KVB} = 664 - 346 = 318 < 800 \text{ квар.}$$

Установка БК на стороне 10 кВ нецелесообразна.

Принимаем двухтрансформаторную КТП с трансформатором типа ТМГ-250/10 и двумя КУ типа АУКРМ 0,4 на 175 квар каждая.

5.Находим время максимальных потерь

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_M}{10000} \right)^2 \cdot T_P , \quad (3.20)$$

$$\tau = \left(0,124 + \frac{5552}{10000} \right)^2 \cdot 8760 = 4041,1 \text{ ч.}$$

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

Найдем удельную стоимость потерь холостого хода в трансформаторе

$$C_{XX} = \left(\frac{\alpha \cdot 12}{T_M} + \beta \right) \cdot T_P , \quad (3.21)$$

$$C_{XX} = \left(\frac{361,9 \cdot 12}{5552} + 1,352 \right) \cdot 8760 = 18,696 \text{ тыс.руб/кВт .}$$

Найдем удельную стоимость активных нагрузочных потерь

$$C_{K3} = \left(\frac{\alpha \cdot 12}{T_M} + \beta \right) \cdot \tau , \quad (3.22)$$

$$C_{K3} = \left(\frac{361,9 \cdot 12}{5552} + 1,352 \right) \cdot 4041,1 = 8,625 \text{ тыс.руб/кВт ,}$$

$$C \cdot \Delta P_T = C_{XX} \cdot \Delta P_{XX} + C_{K3} \cdot K_3^2 \cdot \Delta P_{K3} , \quad (3.23)$$

$$C \cdot \Delta P_T = 18,696 \cdot 0,55 + 8,625 \cdot 0,8^2 \cdot 3,1 = 27,394 \text{ тыс.руб.}$$

7.Найдем приведенные затраты на сооружение КТП

$$Z_{кТП} = E \cdot (K_T \cdot N_T + K_{кУ} \cdot N_{кУ}) + C \cdot \Delta P \cdot N_T, \quad (3.24)$$

$$Z_{кТП} = 0.223 \cdot ((146.7 \cdot 2) + (67 \cdot 2)) + (27.394 \cdot 2) = 150.098 \text{ тыс.руб.}$$

Рассмотрим вариант с силовым трансформатором ТМГ-400/10.

По справочным таблицам каталогов производителей находим $\Delta P_{xx} = 0.8$ кВт; $\Delta P_{к3} = 5.5$ квар; $i_{xx} = 2.1\%$; $u_{к3} = 4.5\%$, $K_T = 191.9$ тыс. руб.

Найдем величину потерь мощности в трансформаторах:

$$\Delta P_{mp} = N_T \cdot (P_{xx} + K_3^2 \cdot P_{к3}), \quad (3.25)$$

$$\Delta P_{mp} = 2 \cdot (0.8 + 0.8^2 \cdot 5.5) = 8.64 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_{mp} = N_T \cdot (i_0 + K_3^2 \cdot U_{к3}) \cdot \frac{S_n}{100}, \quad (3.26)$$

$$\Delta Q_{mp} = 2 \cdot (2.1 + 0.8^2 \cdot 4.5) \cdot \frac{400}{100} = 39.84 \text{ квар.}$$

Найдем расчетную нагрузку по цеху с учетом потерь мощности в силовых трансформаторах:

$$P_P = P_{p\Sigma} + n_m \cdot \Delta P_{mp}, \quad (3.27)$$

$$P_P = 306.7 + 2 \cdot 8.64 = 324 \text{ кВт},$$

$$Q_P = Q_{p\Sigma} + n_m \cdot \Delta Q_{mp}, \quad (3.28)$$

$$Q_P = 602.7 + 2 \cdot 39.84 = 682.4 \text{ квар},$$

$$Q_{\min} = 0,7 \cdot Q_P, \quad (3.29)$$

$$Q_{\min} = 0,7 \cdot 682.4 = 477.7 \text{ квар.}$$

8. Определим значения входных реактивных мощностей:

$$a) \quad Q'_{\text{эл}} = Q_P - 0,7 Q_{\text{сд}}, \quad (3.30)$$

$$Q'_{\text{эл}} = 682.4 - 0.7 \cdot 0 = 682.4 \text{ квар};$$

$$Q''_{\text{э1}} = \alpha P_p, \quad (3.31)$$

$$Q''_{\text{э1}} = 0.28 \cdot 324 = 90.7 \text{ квар.}$$

Из найденных значений принимаем наименьшее: $Q_{\text{э1}} = 90.7$ квар.

$$\text{б) } Q_{\text{э2,в}} = Q_{\text{min}} - Q_{\text{кд}} = Q_{\text{min}} - (Q_p - Q_{\text{э1}}), \quad (3.32)$$

$$Q_{\text{э2,в}} = 477.7 - (682.4 - 90.7) = -114 \text{ квар;}$$

$$Q_{\text{э2,н}} = Q_{\text{min}} + Q_{\text{к}}, \quad (3.33)$$

$$Q_{\text{э2,н}} = 477.7 + 0 = 477.7 \text{ квар;}$$

$$Q_{\text{к}} = 0.$$

Так как в часы минимальных нагрузок напряжение будет повышенным, то $Q_{\text{э2}} = Q_{\text{э2,н}} = 477.7$ квар.

9. Найдем суммарную мощность КУ:

$$Q_{\text{куmax}} = 1,15 \cdot Q_p - Q_{\text{э1}}, \quad (3.34)$$

$$Q_{\text{куmax}} = 1,15 \cdot 682.4 - 90.7 = 694.1 \text{ квар.}$$

При этом мощность конденсаторных установок без ступеней регулирования:

$$Q_{\text{куmin}} = Q_{\text{min}} - Q_{\text{э2}}, \quad (3.35)$$

$$Q_{\text{куmin}} = 477.7 - 477.7 = 0.$$

Таким образом, все установки должны быть регулируемыми.

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

$$Q_{эH} = Q_{э1} - Q_6, \quad (3.36)$$

$$Q_{эH} = 90.7 - (682.4 - 602.7) = 11 \text{ квар.}$$

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

$$Q_T = \sqrt{(N_T K_3 S_H)^2 - P_{p\Sigma}^2}, \quad (3.37)$$

$$Q_T = \sqrt{(2 \cdot 0.8 \cdot 400)^2 - 306.7^2} = 561.7 \text{ квар,}$$

$$Q_{KVH} = Q_{P\Sigma} - Q_T, \quad (3.38)$$

$$Q_{KVH} = 602.7 - 561.7 = 41 \text{ квар,}$$

$$Q_{.KVB} = Q_{KV \max} - Q_{KVH}, \quad (3.39)$$

$$Q_{.KVB} = 694.1 - 41 = 653 < 800 \text{ квар.}$$

Установка БК на стороне 0.4 и 10 кВ нецелесообразна.

Принимаем двухтрансформаторную КТП с трансформаторами типа ТМГ-400/10.

12. Определяем стоимость потерь электроэнергии в силовом трансформаторе за год:

$$C \cdot \Delta P_T = C_{XX} \cdot \Delta P_{XX} + C_{K3} \cdot K_3^2 \cdot \Delta P_{K3}, \quad (3.40)$$

$$C \cdot \Delta P_T = 18.696 \cdot 0.8 + 8.625 \cdot 0.8^2 \cdot 5.5 = 45.315 \text{ тыс.руб.}$$

13. Найдем приведенные затраты на сооружение КТП

$$Z_{КТП} = E \cdot (K_T \cdot N_T + K_{KV} \cdot N_{KV}) + C \cdot \Delta P \cdot N_T, \quad (3.41)$$

$$Z_{КТП} = 0.223 \cdot 191.9 \cdot 2 + 45.315 \cdot 2 = 176.217 \text{ тыс.руб.}$$

По наименьшим приведенным затратам окончательно принимаем двухтрансформаторную КТП с трансформаторами типа ТМГ-250/10. Компенсация реактивной мощности осуществляется на стороне 0,4 кВ двумя КУ типа АУКРМ 0,4 на 175 квар каждая.

Для остальных цехов расчеты выполняем аналогичным образом.

4 Выбор типа, числа и мощности трансформаторов ГПП

Выбор 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 [15-17].

Величина рационального напряжения может быть определена по формуле Стилла:

$$U_{РАЦ} = 4.34 \cdot \sqrt{L + 0.016 \cdot P_{РП}}, \quad (4.1)$$
$$U_{РАЦ} = 4.34 \cdot \sqrt{6 + 0.016 \cdot 32653} = 100 \text{ кВ},$$

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

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

Найдем активную расчетную нагрузку промышленного предприятия:

$$P_{РП} = P_{РН} + P_{РВ} + P_{СТОП}, \quad (4.2)$$
$$P_{РП} = 21213 + 11440 + 0 = 32653 \text{ кВт},$$

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

$P_{РВ}$ – суммарное расчетное значение активной нагрузки высоковольтных электроприемников предприятия;

$P_{\text{сгор}}$ - суммарное расчетное значение активной нагрузки сторонних потребителей.

Определим значение полной расчетной мощности промышленного предприятия:

$$S_{PI} = \sqrt{P_{PI}^2 + Q_{\text{ЭС}}^2}, \quad (4.3)$$
$$S_{PI} = \sqrt{32653^2 + 7510^2} = 33505 \text{ кВА},$$

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

$$Q_{\text{ЭС}} = P_{PI} \cdot \text{tg}\phi, \quad (4.4)$$
$$Q_{\text{ЭС}} = 32653 \cdot 0.23 = 7510 \text{ квар.}$$

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:

$$S_{\text{номт}} \approx K_{1-2} \cdot S_{PI} \frac{1}{K_{\text{пер}}}, \quad (4.5)$$
$$S_{\text{номт}} \approx 0,8 \cdot 33505 \cdot \frac{1}{1,4} = 19146 \text{ кВА}$$

Согласно полученному значению полной мощности предприятия принимаем для последующего рассмотрения силовые трансформаторы с $S_{\text{номт}}$ равной 25 и 40 МВА.

Выбираем по каталогу производителя силовые трансформаторы марок: ТРДН-25000/110/10/10 и ТРДН-40000/110/10/10.

4.1 Техничко-экономическое обоснование оптимальной номинальной мощности силового трансформатора ГПП

4.1.1 Вариант главной понизительной подстанции с силовыми трансформаторами ТРДН-25000/110/10/10.

Технические характеристики силового трансформатора ТРДН-25000/110/10/10 приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Технические характеристики силового трансформатора ТРДН-25000/110/10/10

Марка СТ	$S_{ном}$, МВА	Данные из каталога производителя						Стоимость 1го тр-ра, тыс.руб
		$U_{ном}$, кВ		U_k , %	ΔP_k , кВт	ΔP_x , кВт	I_x , %	
		ВН	НН					
ТРДН-25000/110/10/10	25	115	10.5	10.5	122	24	0.63	22019

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

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

$$\Delta P_x' = 24 + 0,05 \cdot 157,5 = 31,88 \text{ кВт},$$

где

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

$$\Delta Q_x = 0,5 \cdot 25000 / 100 = 157,5 \text{ квар},$$

$$K_{ин} = 0,05 \text{ кВт/квар}.$$

Находим приведенные нагрузочные потери мощности трансформатора:

- для обмотки высшего напряжения:

$$\Delta Q_{к.в} = U_{к.в\%} \cdot S_{ном\ T} / 100, \quad (4.8)$$

$$\Delta Q_{к} = 10,5 \cdot 25000 / 100 = 2625 \text{ квар},$$

$$U_{к.в\%} = 0,125 \cdot u_{к.ВН-НН}, \quad (4.9)$$

$$U_{к.в\%} = 0,125 \cdot 10,5 = 1,3 \%,$$

$$\Delta P'_{к.в} = \Delta P_{к.в} + K_{un} \cdot \Delta Q_{к.в}, \quad (4.10)$$

$$\Delta P'_{к.в} = 0 + 0,05 \cdot 2625 = 131,3 \text{ кВт},$$

$$\Delta P_{к.в} = 0.$$

- для обмоток низшего напряжения:

$$\Delta Q_{к.н1} = \Delta Q_{к.н2} = U_{к.н1,2\%} \cdot S_{ном\ T} / 100, \quad (4.11)$$

$$\Delta Q_{к.н1} = \Delta Q_{к.н2} = 18,375 \cdot 25000 / 100 = 4593,8 \text{ квар},$$

$$U_{к.н1\%} = U_{к.н2\%} = 1,75 \cdot u_{к.ВН-НН}, \quad (4.12)$$

$$U_{к.н1\%} = U_{к.н2\%} = 1,75 \cdot 10,5 = 18,375 \%,$$

$$\Delta P'_{к.н1} = \Delta P'_{к.н2} = \Delta P_{к.н1,2} + K_{un} \cdot \Delta Q_{к.н1,2}, \quad (4.13)$$

$$\Delta P'_{к.н1} = \Delta P'_{к.н2} = 244 + 0,05 \cdot 4593,8 = 473,7 \text{ кВт},$$

$$\Delta P_{к.н1,2} = 2 \cdot \Delta P_{к.ВН-НН}, \quad (4.14)$$

$$\Delta P_{к.н1,2} = 2 \cdot 122 = 244 \text{ кВт}.$$

Коэффициенты загрузки обмоток трансформатора:

$$K_{з.в} = \frac{S_B}{S_{ном,Т}}, \quad (4.15)$$

$$K_{з.в} = \frac{33505}{25000} = 1,34.$$

$$K_{3.н1} = K_{3.н2} = \frac{S_{H1,2}}{S_{ном,T}}, \quad (4.16)$$

$$K_{3.н1} = K_{3.н2} = \frac{16752.5}{25000} = 0.67.$$

Приведенные потери активной мощности в силовом трансформаторе:

$$P_m^{\dot{}} = \Delta P_x^{\dot{}} + K_{3.в}^2 \cdot \Delta P_{к.в}^{\dot{}} + K_{3.н1}^2 \cdot \Delta P_{к.н1}^{\dot{}} + K_{3.н2}^2 \cdot \Delta P_{к.н2}^{\dot{}}, \quad (4.17)$$

$$P_m^{\dot{}} = 31.88 + 1.34^2 \cdot 131.3 + 0.67^2 \cdot 473.7 + 0.67^2 \cdot 473.7 = 693 \text{ кВт}.$$

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

$$\Delta W_{nc} = \sum \Delta W_{xi} + \sum \Delta W_{ki} = \sum n_i \cdot \Delta P'_x \cdot T_i + \sum \left(\frac{1}{n_i} \cdot K_{3.вi}^2 \cdot \Delta P'_{к.в} \cdot T_i + \frac{1}{n_i} \cdot K_{3.н1i}^2 \cdot \Delta P'_{к.н1} \cdot T_i + \frac{1}{n_i} \cdot K_{3.н2i}^2 \cdot \Delta P'_{к.н2} \cdot T_i \right) \quad (4.18)$$

Результаты расчетов потерь электрической энергии в силовых трансформаторах ГПП ТРДН-25000/110/10/10 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:

$$I_{\Delta WПТС} = \Delta W_{nc} \cdot C_{\vartheta}, \quad (4.19)$$

$$I_{\Delta WПТС} = (1372011 + 558450) \cdot 2,134 = 4120 \text{ тыс. руб.}$$

где $C_{\vartheta} = 2,134 \text{ руб/кВт}\cdot\text{ч}$ - стоимость 1 кВт·ч электроэнергии.

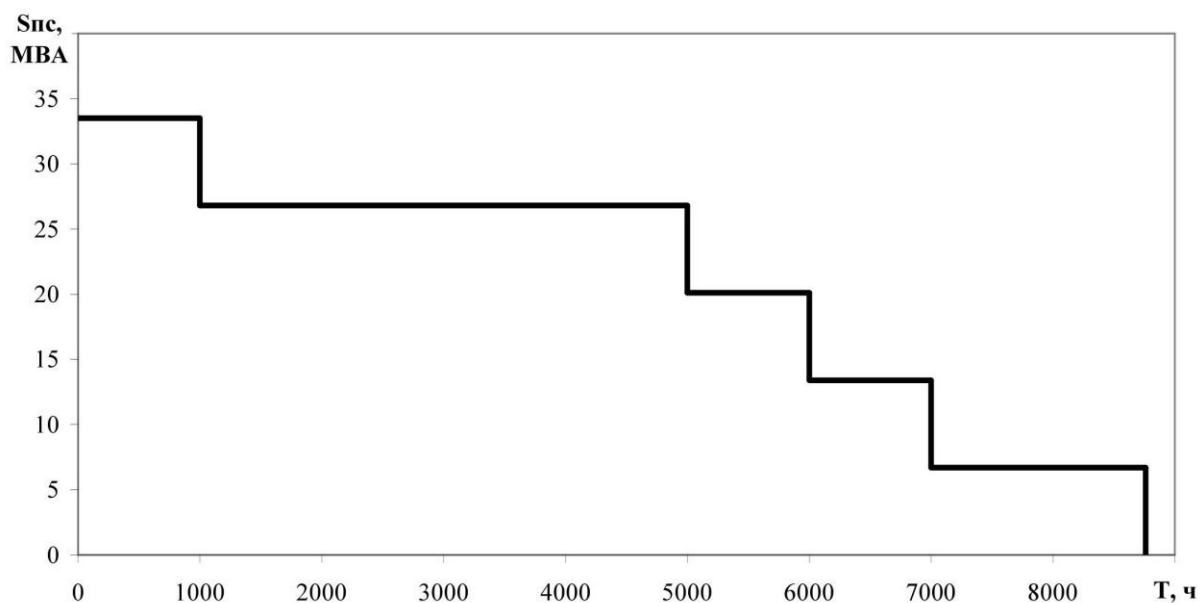


Рисунок 4.1 - Годовой график нагрузки ГПП

Найдем суммарные приведенные затраты:

$$Z_{прив} = E_n \cdot K + I = E_n \cdot K + I_9 + I_{\Delta WПС} \quad (4.20)$$

$$Z_{прив} = 0,25 \cdot 44038 + 4140 + 4120 = 19269 \text{ тыс.руб.}$$

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

$K = 2 \cdot 22019 = 44038$ тыс.руб. – стоимость силовых трансформаторов ГПП;

$I_9 = P_{сум} \cdot K = 0,094 \cdot 44038 = 4140$ тыс.руб. – ежегодные отчисления.

4.1.2 Вариант главной понизительной подстанции с силовыми трансформаторами ТРДН-40000/110/10/10.

Технические характеристики силового трансформатора ТРДН-40000/110/10/10 приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Технические характеристики силового трансформатора ТРДН-40000/110/10/10

Марка СТ	$S_{ном}$, МВА	Данные из каталога производителя						Стоимость 1го тр-ра, тыс.руб
		$U_{ном}$, кВ		U_k , %	ΔP_k , кВт	ΔP_x , кВт	I_x , %	
		ВН	НН					
ТРДН-40000/110/10/10	40	115	10.5	10.5	165	37	0.53	35231

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

$$\Delta P_x' = \Delta P_x + K_{ин} \cdot \Delta Q_x, \quad (4.21)$$

$$\Delta P_x' = 37 + 0,05 \cdot 212 = 47,6 \text{ кВт},$$

где

$$\Delta Q_x = I_{xx\%} + S_{ном.m} / 100, \quad (4.22)$$

$$\Delta Q_x = 0,53 \cdot 40000 / 100 = 212 \text{ квар},$$

$$K_{ин} = 0,05 \text{ кВт/квар}.$$

Находим приведенные нагрузочные потери мощности трансформатора:

- для обмотки высшего напряжения:

$$\Delta Q_{к.в} = U_{к.в\%} \cdot S_{ном.m} / 100, \quad (4.23)$$

$$\Delta Q_{к.в} = 10,5 \cdot 40000 / 100 = 4200 \text{ квар},$$

$$U_{к.в\%} = 0,125 \cdot u_{к.ВН-НН}, \quad (4.24)$$

$$U_{к.в\%} = 0,125 \cdot 10,5 = 1,3 \%,$$

$$\Delta P'_{к.в} = \Delta P_{к.в} + K_{ин} \cdot \Delta Q_{к.в}, \quad (4.25)$$

$$\Delta P'_{к.в} = 0 + 0,05 \cdot 4200 = 210 \text{ кВт},$$

$$\Delta P_{к.б} = 0.$$

- для обмоток низшего напряжения:

$$\Delta Q_{к.н1} = \Delta Q_{к.н2} = U_{к.н1,2\%} \cdot S_{ном\ T} / 100, \quad (4.26)$$

$$\Delta Q_{к.н1} = \Delta Q_{к.н2} = 18,375 \cdot 40000 / 100 = 7350 \text{ квар},$$

$$U_{к.н1\%} = U_{к.н2\%} = 1,75 \cdot u_{к.ВН-НН}, \quad (4.27)$$

$$U_{к.н1\%} = U_{к.н2\%} = 1,75 \cdot 10,5 = 18,375 \%,$$

$$\Delta P'_{к.н1} = \Delta P'_{к.н2} = \Delta P_{к.н1,2} + K_{ун} \cdot \Delta Q_{к.н1,2}, \quad (4.28)$$

$$\Delta P'_{к.н1} = \Delta P'_{к.н2} = 330 + 0,05 \cdot 7350 = 697,5 \text{ кВт},$$

$$\Delta P_{к.н1,2} = 2 \cdot \Delta P_{к.ВН-НН}, \quad (4.29)$$

$$\Delta P_{к.н1,2} = 2 \cdot 165 = 330 \text{ кВт}.$$

Коэффициенты загрузки обмоток трансформатора:

$$K_{з.б} = \frac{S_B}{S_{ном,Т}}, \quad (4.30)$$

$$K_{з.б} = \frac{33505}{40000} = 0.84.$$

$$K_{з.н1} = K_{з.н2} = \frac{S_{н1,2}}{S_{ном,Т}}, \quad (4.31)$$

$$K_{з.н1} = K_{з.н2} = \frac{16752.5}{40000} = 0.42.$$

Приведенные потери активной мощности в силовом трансформаторе:

$$P_m^{\dot{}} = \Delta P_x^{\dot{}} + K_{з.б}^2 \cdot \Delta P_{к.б}^{\dot{}} + K_{з.н1}^2 \cdot \Delta P_{к.н1}^{\dot{}} + K_{з.н2}^2 \cdot \Delta P_{к.н2}^{\dot{}}, \quad (4.32)$$

$$P_m^{\dot{}} = 47.6 + 0.84^2 \cdot 210 + 0.42^2 \cdot 697.5 + 0.42^2 \cdot 697.5 = 439.6 \text{ кВт}.$$

Результаты расчетов потерь электрической энергии в силовых трансформаторах ГПП ТРДН-40000/110/10/10 заносим в таблицу 4.4.

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

$$I_{\Delta W_{ПТС}} = \Delta W_{nc} \cdot C_{\text{э}}, \quad (4.33)$$

$$I_{\Delta W_{ПТС}} = (813536 + 833952) \cdot 2,134 = 3516 \text{ тыс. руб.}$$

где $C_{\text{э}} = 2,134$ руб/кВт·ч - стоимость 1 кВт·ч электроэнергии.

Найдем суммарные приведенные затраты:

$$Z_{\text{прив}} = E_n \cdot K + I = E_n \cdot K + I_{\text{э}} + I_{\Delta W_{ПТС}} \quad (4.34)$$

$$Z_{\text{прив}} = 0,25 \cdot 70462 + 6623 + 3516 = 27755 \text{ тыс.руб.}$$

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

$K = 2 \cdot 35231 = 70462$ тыс.руб. – стоимость силовых трансформаторов ГПП;

$I_{\text{э}} = P_{\text{сум}} \cdot K = 0,094 \cdot 70462 = 6623$ тыс.руб. – ежегодные отчисления.

Так как затраты на трансформаторы ТРДН-40000/110/10/10 значительно превышают затраты на трансформаторы ТРДН-25000/110/10/10, то выбираем для дальнейшего рассмотрения и установки на проектируемой подстанции трансформаторы ТРДН-25000/110/10/10.

Таблица 4.3 - Результаты расчетов потерь электрической энергии в силовых трансформаторах ГПП ТРДН-25000/110/10/10

i	S_{Bi} , МВА	S_{H1i} , МВА	S_{H2i} , МВА	n_i	T_i , ч	ΔW_{xi} , кВт·ч	$K_{зBi}$	$K_{зH1i}$	$K_{зH2i}$	$\Delta W_{кBi}$, кВт·ч	$\Delta W_{кH1i}$, кВт·ч	$\Delta W_{кH2i}$, кВт·ч
1	33.505	16.753	16.753	2	1000	63750	1.340	0.670	0.670	117871	106351	106351
2	26.804	13.402	13.402	2	4000	255000	1.072	0.536	0.536	301751	272258	272258
3	20.103	10.052	10.052	2	1000	63750	0.804	0.402	0.402	42434	38286	38286
4	13.402	6.701	6.701	2	1000	63750	0.536	0.268	0.268	18859	17016	17016
5	6.701	3.351	3.351	2	1760	112200	0.268	0.134	0.134	8298	7487	7487
$\Sigma \Delta W_{xi} = 558450$										$\Sigma \Delta W_{кBi} = 1372011$		

Таблица 4.4 - Результаты расчетов потерь электрической энергии в силовых трансформаторах ГПП ТРДН-40000/110/10/10

i	S_{Bi} , МВА	S_{H1i} , МВА	S_{H2i} , МВА	n_i	T_i , ч	ΔW_{xi} , кВт·ч	$K_{зBi}$	$K_{зH1i}$	$K_{зH2i}$	$\Delta W_{кBi}$, кВт·ч	$\Delta W_{кH1i}$, кВт·ч	$\Delta W_{кH2i}$, кВт·ч
1	33.505	16.753	16.753	2	1000	95200	0.838	0.419	0.419	73670	61172	61172
2	26.804	13.402	13.402	2	4000	380800	0.670	0.335	0.335	188594	156601	156601
3	20.103	10.052	10.052	2	1000	95200	0.503	0.251	0.251	26521	22022	22022
4	13.402	6.701	6.701	2	1000	95200	0.335	0.168	0.168	11787	9788	9788
5	6.701	3.351	3.351	2	1760	167552	0.168	0.084	0.084	5186	4307	4307
$\Sigma \Delta W_{xi} = 833952$										$\Sigma \Delta W_{кBi} = 813536$		

5 Выбор схемы подстанции

Схемы ГПП могут быть выполнены с силовыми выключателями на стороне высшего напряжения или по так называемым упрощенным схемам, т. е. без выключателей на стороне высокого напряжения. На вторичном напряжении 6-10 кВ, как правило, применяется одиночная секционированная система шин. Трансформаторы к секциям подключаются через вводные выключатели, секционный выключатель при нормальном режиме работы отключен для уменьшения токов короткого замыкания [9, 18].

Блоки распределительного устройства высшего напряжения комплектуются современным высоковольтным электрооборудованием отечественного и зарубежного производства. Конструктивно подстанции могут выполняться открытыми, при этом распределительное устройство низшего напряжения может выполняться из шкафов наружной установки или устанавливаться в закрытых помещениях или с установкой трансформаторов открыто, а распределительных устройств высшего и низшего напряжения в помещении.

В настоящее время производится замена масляных выключателей, отделителей и короткозамыкателей на современные элегазовые и вакуумные выключатели. Кроме того высоковольтные выключатели применяются на высокой стороне ГПП при: специальных требованиях к самозапуску электродвигателей 6-10 кВ, подключаемых к РУ ГПП; упрощению УРЗиА по сравнению с использованием отделителей; при перспективе установки на подстанции СШ 110-220 кВ; при возможности двухстороннего питания по линии; при невозможности использования короткозамыкателей и высокой стоимости линии связи для передачи отключающего импульса.

Для ГПП предприятия выбираем схему с высоковольтными выключателями на стороне высокого напряжения и с двойной секционированной секционным выключателем системой шин на стороне низкого напряжения.

6 Расчет токов короткого замыкания

Определение токов короткого замыкания в различных точках системы электроснабжения предприятия выполняется по упрощенному способу с учетом следующих допущений [2, 19, 20]:

- 1) трехфазную систему принимают симметричной;
- 2) процесс насыщения магнитной системы элементов в расчетах не учитывается, таким образом, все цепи при расчетах считаются линейными;
- 3) намагничивающий ток трансформаторов в расчетах не учитывают как и емкостные проводимости всех элементов, входящих в цепь короткого замыкания;
- 4) во время всего процесса протекания тока короткого замыкания ЭДС генераторов в системе принимают совпадающими по фазе;
- 5) ЭДС источников питания, расположенных на значительном расстоянии от точки КЗ, принимают неизменяющимся во времени.

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

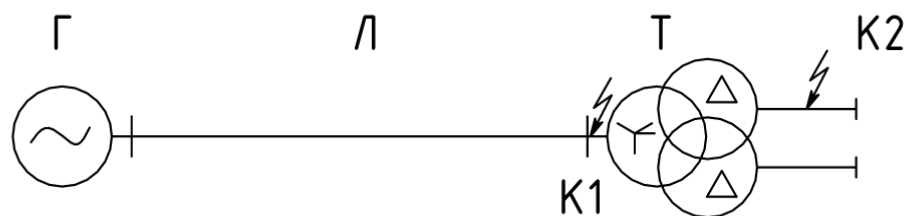


Рисунок 6.1 - Расчётная схема для определения токов КЗ

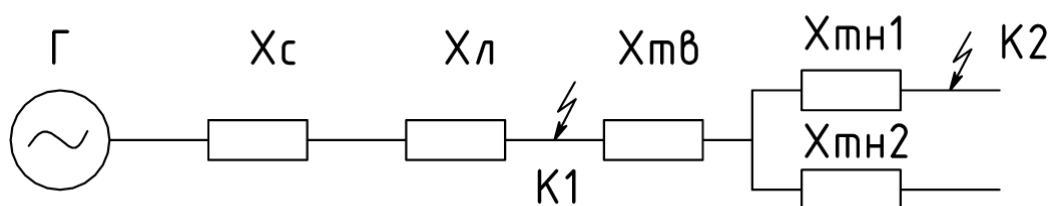


Рисунок 6.2 - Схема замещения для определения токов КЗ

Исходные данные для расчета токов КЗ:

Параметры системы: $U_{cp} = 115$ кВ; $S_{\sigma} = 1000$ МВА; $S_{\kappa} = 3500$ МВА.

Параметры линии: $x_{y\delta} = 0,4$ Ом/км; $L = 9$ км.

Параметры силового трансформатора: $S_H = 25$ МВА; $U_{\kappa} = 10.5$ %.

Найдем сопротивление системы:

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

$$x_{c.\delta} = \frac{1000}{3500} = 0.286.$$

Найдем сопротивление воздушной линии:

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

$$x_{BL.\delta} = \frac{0.4}{2} \cdot 9 \cdot \frac{1000}{115^2} = 0.136.$$

Найдем сопротивление силового трансформатора:

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

$$x_{T.B.\delta} = \frac{1.3125}{100} \cdot \frac{1000}{25} = 0.525.$$

$$x_{T.H.\delta} = \frac{U_{\kappa.н}, \%}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_H}; \quad (6.4)$$

$$x_{T.H.\delta} = \frac{18.375}{100} \cdot \frac{1000}{25} = 7.350.$$

Найдем результирующее сопротивление в точке К1:

$$x_{рез1} = x_{с.б} + x_{ВЛ.б}; \quad (6.5)$$

$$x_{рез1} = 0.286 + 0.136 = 0.422.$$

Найдем базисный ток в точке К1:

$$I_{б.к1} = \frac{S_{б}}{\sqrt{3} \cdot U_{сн}}; \quad (6.6)$$

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

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

$$I_{к1}^3 = \frac{E_{б}}{x_{рез1}} \cdot I_{б}; \quad (6.7)$$

$$I_{к1}^3 = \frac{1}{0.422} \cdot 5.02 = 11.902 \text{ кА.}$$

Найдем ударный ток КЗ в точке К1:

$$i_{уд.к1} = \sqrt{2} \cdot I_{н.о}^3 \cdot K_{уд}; \quad (6.8)$$

$$i_{уд.к1} = \sqrt{2} \cdot 11.902 \cdot 1.8 = 30.297 \text{ кА.}$$

Найдем результирующее сопротивление в точке К2:

$$x_{рез2} = x_{рез1} + x_{Т.В.б} + x_{Т.Н.б}; \quad (6.9)$$

$$x_{рез2} = 0.422 + 0.525 + 7.35 = 8.297.$$

Найдем базисный ток в точке К2:

$$I_{\sigma.K2} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{CH}}; \quad (6.10)$$

$$I_{\sigma.K2} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10.5} = 91.643 \text{ кА.}$$

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

$$I_{K2}^3 = \frac{E_{\sigma}}{x_{PE32}} \cdot I_{\sigma.K2}; \quad (6.11)$$

$$I_{K2}^3 = \frac{1}{8.297} \cdot 91.643 = 11.046 \text{ кА.}$$

Найдем ударный ток КЗ в точке К2:

$$i_{y\delta.K2} = \sqrt{2} \cdot I_{n,o}^3 \cdot K_{y\delta}; \quad (6.12)$$

$$i_{y\delta.K2} = \sqrt{2} \cdot 11.046 \cdot 1.85 = 28.898 \text{ кА.}$$

Полученные результаты сведем в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты расчетов токов КЗ

	U_{CH} , кВ	$K_{y\delta}$	I_{K}^3 , кА	$i_{y\delta}$, кА
К1	115	1.8	11.9	30.3
К2	10.5	1.85	11	28.9

7 Расчет и выбор электрического оборудования и проводников

7.1 Выбор электрического оборудования на стороне высокого напряжения 110 кВ

7.1.1 Выбор высоковольтного выключателя

На стороне 110 кВ предварительно выбираем высоковольтный выключатель DT1-145FK.

Высоковольтный выключатель выбирается и проверяется по:

- номинальному напряжению:

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

- номинальному току:

$$I_{max} < I_n, \quad (7.2)$$
$$176 \text{ А} < 1000 \text{ А},$$

где

$$I_{max} = 1.4 \cdot \frac{S_{н.Т}}{\sqrt{3} \cdot U_{сн}}, \quad (7.3)$$
$$I_{max} = 1.4 \cdot \frac{25000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 176 \text{ А};$$

- по отключающей способности:

$$I_{к1} \leq I_{откл.н}, \quad (7.4)$$

$$11.9 \text{ кА} \leq 40 \text{ кА},$$

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

$$6.4 \text{ кА} \leq 19.8 \text{ кА},$$

где

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

$$i_{a.\tau} = \sqrt{2} \cdot 11.9 \cdot e^{\frac{-0.048}{0.05}} = 6.4 \text{ кА},$$

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

$$i_{a.n.} = \left(\sqrt{2} \cdot \frac{35}{100} \right) \cdot 40 = 19.8 \text{ кА},$$

- по предельному сквозному току КЗ:

$$I_{к1} \leq I_{пр.с}, \quad (7.8)$$

$$11.9 \text{ кА} \leq 40 \text{ кА};$$

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

$$30.3 \text{ кА} \leq 63 \text{ кА};$$

- по значению теплового импульса:

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

$$21 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 156.8 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

Выбранный высоковольтный выключатель DT1-145FK 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 РНДЗ-2-110/1000 У1.

Разъединитель выбирается и проверяется по:

- номинальному напряжению:

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

- номинальному току:

$$I_{max} < I_n, \quad (7.12)$$
$$176 \text{ А} < 1000 \text{ А},$$

- по предельному сквозному току КЗ:

$$i_{уд} \leq i_{нр.с}, \quad (7.13)$$
$$30.3 \text{ кА} \leq 80 \text{ кА};$$

- по значению теплового импульса:

$$B_k \leq I_{нр.с}^2 \cdot t_{нр.с}, \quad (7.14)$$
$$21 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 97.2 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Выбранный разъединитель РНДЗ-2-110/1000 У1 прошел проверку.

7.1.3 Выбор трансформатора тока

На стороне 110 кВ предварительно выбираем трансформатор тока типа ТВТ110 - 1 - 200/5.

Трансформатор тока выбираем и проверяем по следующим условиям:

- номинальному напряжению:

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

- номинальному току:

$$I_{\max} \leq I_{Н.ТТ}, \quad (7.16)$$
$$176 \text{ А} \leq 200 \text{ А};$$

- электродинамической стойкости:

$$i_{уд} \leq i_{э\text{лдин.ст}}, \quad (7.17)$$
$$30.3 \text{ кА} \leq 40 \text{ кА};$$

- термической стойкости:

$$B_k \leq K_T^2 \cdot I_{1\text{ном.}}^2 \cdot t_{откл} = I_T^2 \cdot t_{откл}, \quad (7.18)$$
$$21 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 61.3 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

- вторичной нагрузке:

$$Z_2 \leq Z_{2\text{ном}}, \quad (7.19)$$

Принимаем $Z_2 \approx R_2$

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

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:

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

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

Найдем минимальное сечение соединительных медных проводов:

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

$$s = \frac{0.0175 \cdot 75}{1.096} = 1.198 \text{ мм}^2.$$

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

Выбранный трансформатор тока ТВТ110 - 1 - 200/5 прошел проверку.

7.1.4 Выбор гибких шин

Гибкие шины на напряжение 110 кВ выполняются сталеалюминевыми проводами марки АС.

Найдем сечение проводов:

$$s = \frac{I_{\text{раб. ном}}}{j_3}; \quad (7.23)$$

$$s = \frac{126}{1} = 126 \text{ мм}^2.$$

Выбираем провод типа АС-120/19 мм² с длительно допустимым током провода 390 А.

Найдем максимальное значение критической напряженности электрического поля:

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

$$E_0 = 30.3 \cdot 0.82 \cdot \left(1 + \frac{0.299}{\sqrt{0.76}} \right) = 33.4 \text{ кВ/м.}$$

Найдем напряженность около провода:

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

$$E = \frac{0.354 \cdot 115}{0.76 \cdot \lg \frac{1.26 \cdot 300}{0.76}} = 19.9 \text{ кВ/м.}$$

Условие отсутствия короны:

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

$$21.3 \text{ кВ/м} < 30 \text{ кВ/м}.$$

Провод АС-120/19 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 ВВ/TEL-10-31.5/2000 У2.

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:

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

$$1604 \text{ А} < 2000. \text{ А},$$

где

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

$$I_{max} = 1.4 \cdot \frac{25000}{\sqrt{3} \cdot 10.5 \cdot 2} = 1604 \text{ А};$$

- по отключающей способности:

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

$$11 \text{ кА} \leq 31.5 \text{ кА},$$

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

$$6.8 \text{ кА} \leq 15.6 \text{ кА},$$

где

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

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot 11 \cdot e^{\frac{-0.05}{0.06}} = 6.8 \text{ кА},$$

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

$$i_{a.н} = \left(\sqrt{2} \cdot \frac{35}{100} \right) \cdot 31.5 = 15.6 \text{ кА},$$

- по предельному сквозному току КЗ:

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

$$11 \text{ кА} \leq 31.5 \text{ кА};$$

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

$$28.9 \text{ кА} \leq 80 \text{ кА};$$

- по значению теплового импульса:

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

$$19.4 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 99.2 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Выбранный высоковольтный выключатель ВВ/TEL-10-31.5/2000 У2 прошел проверку.

7.2.2 Выбор трансформатора тока

На стороне 10 кВ предварительно выбираем трансформатор тока типа ТПОЛ – 10/2000 УЗ.

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:

$$I_{\max} \leq I_{Н.ТТ}, \quad (7.38)$$
$$1604 \text{ А} \leq 2000 \text{ А};$$

- электродинамической стойкости:

$$i_{уд} \leq i_{эдин.ст}, \quad (7.39)$$
$$28.9 \text{ кА} \leq 100 \text{ кА};$$

- термической стойкости:

$$B_k \leq K_T^2 \cdot I_{1ном.}^2 \cdot t_{откл} = I_T^2 \cdot t_{откл}, \quad (7.40)$$
$$19.4 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 176.4 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

- 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, ваттметр, варметр, счетчик активной и реактивной энергии с суммарной максимальной мощностью 6.1 ВА. Найдем сопротивление прибора:

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

$$R_{приб} = \frac{6.1}{5^2} = 0.244 \text{ Ом} .$$

Тогда допустимое сопротивление проводов:

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

$$R_{пр} = 1.2 - 0.244 - 0.1 = 0.856 \text{ Ом} .$$

Найдем минимальное сечение соединительных медных проводов:

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

$$s = \frac{0.0175 \cdot 45}{0.856} = 0.92 \text{ мм}^2 .$$

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

Выбранный трансформатор тока ТПОЛ – 10/2000 УЗ 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:

$$U_{\text{сети}} \leq U_n, \quad (7.45)$$

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- по классу точности;

- по величине вторичной нагрузки:

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

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

На стороне 10 кВ выбираем трансформатор напряжения НАМИТ – 10 – 2 УХЛ 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 20 ВА.

Тогда:

$$20 \text{ ВА} \leq 120 \text{ ВА}.$$

Выбранный трансформатор напряжения НАМИТ – 10 – 2 УХЛ прошел проверку.

7.2.4 Выбор жестких шин

Выбираем жесткие шины по экономической плотности тока:

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

$$s = \frac{1146}{1} = 1146 \text{ мм}^2.$$

Выбираем алюминиевые прямоугольные шины сечением 120x10 мм, с длительно допустимым током 2070 А.

Найдем минимально допустимое сечение шины по термической стойкости:

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

$$s_{\text{min}} = \frac{\sqrt{19.4} \cdot 10^3}{66} = 66.7 \text{ мм}^2.$$

Найдем максимальную силу, действующую на проводники при трехфазном КЗ:

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

$$F_{\text{max}}^3 = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{1} \cdot 1 \cdot 28900^2 \cdot 1 \cdot 1 = 144.7 \text{ Н}.$$

Найдем момент сопротивления поперечного сечения шины:

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

$$W = \frac{0.01 \cdot 0.12^2}{6} = 2.4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

Определим максимальное напряжение в материале шины:

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

$$\sigma_{\max} = \frac{144.7 \cdot 1}{8 \cdot 2.4 \cdot 10^{-5}} \cdot 10^{-6} = 0.8 \text{ МПа}.$$

Условие проверки на электродинамическую стойкость:

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

$$0.8 \text{ МПа} \leq 247.1 \text{ МПа},$$

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:

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

$$J = \frac{0.01 \cdot 0.12^3}{12} = 1.4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4.$$

Определим частоту собственных колебаний:

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

$$f_0 = \frac{3.14^2}{2 \cdot \pi \cdot 1^2} \cdot \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 1.4 \cdot 10^{-6}}{2.5}} = 315.3 \text{ Гц}.$$

Т.к. частота собственных колебаний больше 200 Гц, то механический резонанс не появляется.

7.2.5 Выбор опорных изоляторов

Опорные изоляторы необходимы для крепления шин. Выбираем изолятор типа ИОР-10-250 У2.

Опорные изоляторы выбираем и проверяем по параметрам:

- номинальному напряжению:

$$U_{\text{сети}} \leq U_n, \quad (7.57)$$

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- по максимально допустимой нагрузке на головку изолятора:

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

$$144.7 \text{ Н} < 750 \text{ Н},$$

где

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

$$F_{\text{дон}} = 0.6 \cdot 2500 \cdot \frac{0.07}{0.14} = 750 \text{ Н}.$$

где

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

$$H = 0.07 + 0.01 + \frac{0.12}{2} = 0.14.$$

Опорный изолятор ИОР-10-250 У2 прошел проверку.

7.2.6 Выбор проходных изоляторов

Выбираем проходной изолятор типа ИП-10/5000-42,5 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:

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

$$1604 \text{ А} < 5000 \text{ А};$$

- по максимально допустимой нагрузке на головку изолятора:

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

$$41.8 \text{ Н} < 25500 \text{ Н},$$

где

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

$$F_{расч} = 0.5 \cdot \frac{28900^2}{1} \cdot 1 \cdot 10^{-7} = 41.8.$$

Проходной изолятор ИП-10/5000-42,5 УХЛ2 прошел проверку.

8 Расчет заземления подстанции

При времени отключения тока КЗ $\tau = 0.48$ с наибольшее допустимое напряжение прикосновения составляет $U_{np.\partial on} = 500$ В [21].

Найдем напряжение на заземлителе:

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

$$U_3 = \frac{500}{0.280} = 1783 \text{ В},$$

где коэффициент напряжения прикосновения:

$$\kappa_{II} = \frac{M\beta}{\left(\frac{l_6 L_2}{a\sqrt{S}}\right)^{0.45}}, \quad (8.2)$$

$$\kappa_{II} = \frac{0.5 \cdot 0.93}{\left(\frac{5 \cdot 273.9}{10 \cdot \sqrt{1979}}\right)^{0.45}} = 0.28,$$

коэффициент, зависящий от сопротивления тела человека:

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

$$\beta = \frac{1000}{1000 + 1.5 \cdot 50} = 0.93.$$

Найденное значение напряжения на заземлителе находится в пределах допустимого значения 10 кВ.

Сопротивление ЗУ должно соответствовать неравенству:

$$R_3 < R_{3.дон}. \quad (8.4)$$

Найдем число ячеек по стороне расчетной модели заземлителя:

$$m = \frac{L_2}{2 \cdot \sqrt{S}} - 1, \quad (8.5)$$
$$m = \frac{273.9}{2 \cdot \sqrt{1979}} - 1 \approx 2.$$

Найдем длину полос в расчетной модели:

$$L'_2 = 2\sqrt{S}(m+1), \quad (8.6)$$
$$L'_2 = 2\sqrt{1979} \cdot (2+1) = 266.9 \text{ м.}$$

Найдем длину сторон ячейки:

$$b = \frac{\sqrt{S}}{m}, \quad (8.7)$$
$$b = \frac{\sqrt{1979}}{2} = 22.2 \text{ м.}$$

Найдем количество вертикальных заземлителей по периметру контура:

$$n_g = \frac{\sqrt{S} \cdot 4}{1 \cdot l_g}, \quad (8.8)$$
$$n_g = \frac{\sqrt{1979} \cdot 4}{1 \cdot 5} \approx 36.$$

Найдем суммарную длину вертикальных заземлителей:

$$L_{\epsilon} = l_{\epsilon} \cdot n_{\epsilon}, \quad (8.9)$$

$$L_{\epsilon} = 5 \cdot 36 = 180 \text{ м.}$$

Найдем относительную глубину погружения вертикальных электродов:

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

$$\frac{5 + 0.7}{\sqrt{1979}} = 0.128.$$

Найдем суммарное сопротивление сложного заземлителя:

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

$$R_3 = 0.336 \cdot \frac{50}{\sqrt{1979}} + \frac{50}{273.9 + 180} = 0.49 \text{ Ом,}$$

где

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

$$A = 0.444 - 0.84 \cdot 0.128 = 0.336;$$

Суммарное сопротивление сложного заземлителя R_3 меньше допустимого сопротивления $R_{3, \text{дон}}$ $0.49 < 0.5 \text{ Ом}$.

Заключение

В бакалаврской работе решена задача по определению силовой электрической нагрузки машиностроительного завода АО «ДемМЗ». Суммарная расчётная нагрузка предприятия с учетом компенсации реактивной мощности составила $S_p = 33500$ кВА.

На примере ремонтно-строительного цеха произведено технико-экономическое сравнение двух вариантов установки цеховых трансформаторов различной мощности, в результате которого выбрана двухтрансформаторная КТП с силовыми трансформаторами ТМГ-250/10 и двумя КУ типа АУКРМ 0,4 на 175 квар каждая

В качестве напряжения питания предприятия используется напряжение 110 кВ. Внешнее электроснабжение предприятия выполнено воздушными линиями 110 кВ от подстанции энергосистемы. Выполнено технико-экономическое обоснование оптимальной номинальной мощности силовых трансформаторов ГПП, в результате которого к установке приняты трансформаторы ТРДН-25000/110/10/10.

Выполнены расчет токов КЗ, выбор и проверка основных электрических аппаратов на ГПП и выполнен расчет заземления главной понизительной подстанции.

Список использованных источников

1. Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы 6-го и 7-го издания. - Новосибирск: Сибирское университетское издательство, 2016.
2. Сивков, А.А. Основы электроснабжения. Учебное пособие / А.А. Сивков, Д.Ю. Герасимов, А.С. Сайгаш – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012.
3. Вахнина, В.В. Проектирование систем электроснабжения. Электрон. учеб.-метод. пособие / В.В. Вахнина, А.Н. Черненко - Тольятти: ТГУ, 2016.
4. Шлейников, В.Б. Электроснабжение силовых электроприемников цеха промышленного предприятия: учеб. пособие / В.Б. Шлейников, Т.В. Сазонова. - Оренбург : ОГУ, 2014.
5. Galli, S. For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid / S. Galli, A. Scaglione, Z. Wang. - Proceedings of the IEEE, p. 998 – 1027, Vol. 99, Issue 6, 2013.
6. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М: Стандартинформ, 2014.
7. Ghorbani, M.J. Impact of harmonics on power quality and losses in power distribution systems / M.J. Ghorbani, H. Mokhtari. – International Journal of Electrical and Computer Engineering, 5 (1), pp. 166-174, 2015.
8. Вахнина, В.В. Системы электроснабжения. Электрон. учеб.-метод. пособие / В.В. Вахнина, А.Н. Черненко - Тольятти: ТГУ, 2015.
9. Ковалев, И.Н. Электроэнергетические системы и сети: учебник / И. Н. Ковалев. - Москва : Учеб.-метод. центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2015.
10. Щербаков, Е.Ф. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях. Учебное пособие / Е.Ф. Щербаков – Москва: Форум, 2014.

11. Указания по расчету электрических нагрузок. ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект» №358–90 от 1 августа 1993 г.
12. 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.
13. Ковалев, И.Н. Электроэнергетические системы и сети: учебник / И. Н. Ковалев. - Москва : Учеб.-метод. центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2015.
14. Molzahn, D.K. A sufficient condition for power flow insolvability with applications to voltage stability margins / D. K. Molzahn, B. C. Lesieutre, C. L. DeMarco. - IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 3, pp. 2592-2601, 2013.
15. Старшинов, В.А. Электрическая часть электростанций и подстанций. Учебное пособие / В.А. Старшинов, М.В. Пираторов, М.А. Козинова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015.
16. Meier, A. von. Electric power systems: a conceptual introduction / A. von Meier. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.
17. Коробов, Г. В. Электроснабжение: Курсовое проектирование : учеб. пособие / Г. В. Коробов, В. В. Картавцев, Н. А. Черемисинова ; под общ. ред. Г. В. Коробова. - Изд. 3-е, испр. и доп. - Санкт-Петербург : Лань, 2014.
18. Ополева, Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов. Учебное пособие / Г.Н. Ополева – Москва: Инфра-М, 2017.
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.