

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

Институт энергетики и электротехники
(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»
(наименование кафедры)

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

Электроснабжение
(направленность (профиль)/специализация)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему «Проектирование системы электроснабжения металлургического
завода АО «ЛМЗ»

Студент

Н.А. Рыбаков

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

А.Н. Черненко

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« ____ » _____ 2018 г.

Тольятти 2018

Аннотация

Выпускная квалификационная работа (ВКР) бакалавра выполнена на тему «Проектирование системы электроснабжения металлургического завода АО «ЛМЗ»».

В ВКР произведен расчет нагрузок от высоковольтных и низковольтных электроприемников по каждому из цехов АО «ЛМЗ». Произведены технико-экономическое сравнение и выбор оптимальной по затратам мощности силовых трансформаторов КТП, определена необходимость установки конденсаторных установок на КТП. По формуле Стилла определено значение оптимального напряжения питания промышленного предприятия, выбраны количество и мощность силовых трансформаторов на главной понизительной подстанции. Выполнен расчет токов короткого замыкания и выбраны электрические аппараты на ГПП: высоковольтные выключатели, разъединители, трансформаторы тока и напряжения и т.д. Выполнен расчет заземления на ГПП.

ВКР состоит из пояснительной записки объемом 56 листов, включающей 4 таблицы и 3 рисунка. Графическая часть работы представлена 6 листами формата А1.

Содержание

Введение	4
1 Характеристика объекта проектирования	6
2 Определение расчетных электрических нагрузок по цехам предприятия	8
3 Выбор числа и номинальной мощности силовых трансформаторов КТП	13
4 Выбор числа и номинальной мощности силовых трансформаторов на главной понизительной подстанции предприятия	21
5 Выбор схемы внутризаводского электроснабжения	32
6 Определение значений тока КЗ	33
7 Выбор основного электрооборудования ГПП	37
8 Расчет заземления ГПП	50
Заключение	53
Список используемых источников	54

Введение

Правильно выполненные расчеты позволяют выбрать оптимальные параметры электрических сетей предприятия, обеспечить возможность их дальнейшего развития при соблюдении баланса надежности и экономичности [1].

Система электроснабжения промышленного предприятия является частью электроэнергосистемы и частью процесса производства самого предприятия. Электрическая энергия, поступающая в систему электроснабжения промпредприятия, является одной из составляющих производства наряду с другими ресурсами и материалами [2, 3].

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

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

К системе внутрицехового электроснабжения предприятия относятся внутрицеховые сети от трансформаторной подстанции до электроприемников. Для распределения электроэнергии внутри цеха применяются номинальные напряжения 380-660 В. Для питания отдельных электроприемников могут применяться нестандартные значения напряжений. Система внутрицехового электроснабжения в основном выполняется с глухозаземленной нейтралью, что позволяет получить два класса напряжения 380 В для питания большинства

промышленных электроприемников (ЭП) и 220 В для питания однофазных ЭП и сетей освещения [4-6].

Целью бакалаврской работы является проектирование системы электроснабжения металлургического завода АО «ЛМЗ» обеспечивающей при минимальных затратах надежное электроснабжение потребителей электрической энергии.

1 Характеристика объекта проектирования

В 2013 году на промышленной площадке АО «ЛМЗ» началась реализация проекта по строительству листопрокатного комплекса (ЛПК). В марте 2016 года в рамках реализации первой очереди проекта состоялся ввод в эксплуатацию агрегата нанесения полимерных покрытий с технологией Print. Данный агрегат применяется для выпуска холоднокатаного проката с нанесенным декоративным рисунком, который может быть с эффектом 3D. Проектная производительность агрегата – 110 тыс. тонн металлопродукции в год. Во второй очереди проекта планируется построить цех холодного проката с объемом производства 820 тыс. тонн в год.

Завод выпускает прокат марки ЛКПОЦ: прокат тонколистовой холоднокатаный горячеоцинкованный с полимерным (лакокрасочным и пластизольным) покрытием, который применяется при производстве профилированного листа, металлочерепицы, термопанелей, сайдинга, подвесных систем отделки салонов автобусов, вагонов метро и железнодорожных вагонов, для производства корпусных деталей бытовой техники. Возможно производство проката всех цветов линейки RAL, а при производстве используются лакокрасочные и эмалевые покрытия ведущих производителей, таких как PPG (США), AkzoNobel (Швеция), Helios (Словения), PrimeTop (Россия, Швеция).

Так же к продукции завода относится прокат марки ЭЦ: прокат тонколистовой холоднокатаный электролитически оцинкованный, который используется при производстве лицевых и внутренних деталей кузовов автомобилей. С 2000 года АО «ЛМЗ» является единственным поставщиком оцинкованного проката марки ЭЦ (автолиста) для производства деталей кузовов автомобилей LADA и Chevrolet Niva на ОАО «АВТОВАЗ». Приобретение продукции завода позволило ОАО «АВТОВАЗ» полностью отказаться от закупок импортного электролитически оцинкованного проката. Прокат марки ЭОЦ используется для производства изделий методом

профилирования и холодной штамповки, в т.ч. под дальнейшую окраску; для изготовления деталей бытовой техники; для изготовления деталей автокомпонентов (кожухи, экраны); для производства упаковочной ленты; в качестве металлоосновы для окрашивания валковым методом (койл- коутинг). Он обладает отличной адгезией, что позволяет увеличить срок службы лакокрасочных покрытий; обладает высокой пластичностью, что позволяет избежать растрескивания и отслоения покрытия при штамповке, профилировании, гибке и резке; снижает себестоимость готовой продукции, т.к. технология электролитического цинкования не изменяет механические свойства проката, что позволяет использовать более дешевые конструкционные стали без потери качества продукции.

2 Определение расчетных электрических нагрузок по цехам предприятия

К основным методам расчета относят методы определения нагрузки по: установленной мощности электроприемников и значению коэффициента спроса, который определяется по справочникам; средней мощности и значению коэффициента формы графика нагрузки; средней активной мощности и значению коэффициента максимума (расчетному коэффициенту). К вспомогательным методам расчета относят методы определения нагрузки по: удельному расходу электрической энергии на выпуск единицы готовой продукции при известном объеме производства продукции за промежуток времени; удельной нагрузке, приходящейся на единицу площади помещения или приходящейся на одного человека [7, 8].

Расчет нагрузок выполняется по методике, изложенной в [9].

Информацию о коэффициентах использования K_M и коэффициентах мощности $\cos\varphi$ для каждого из цехов предприятия определяем по справочникам.

«Расчетная активная нагрузка группы силовых трехфазных электроприемников на всех ступенях питающих и распределительных сетей находится по средней нагрузке и коэффициенту максимума

$$P_p = K_M \cdot P_C, \quad (2.1)$$

где K_M – коэффициент максимума активной нагрузки при длительности интервала осреднения 30 минут; P_C – средняя активная нагрузка группы за наиболее загруженную смену» [9, с. 10].

«Расчетная реактивная нагрузка группы электроприемников принимается:

$$Q_p = 1.1Q_c \text{ при } n_s \leq 10, \quad (2.2)$$

$$Q_p = Q_c \text{ при } n_p > 10, \quad (2.3)$$

где Q_c – средняя реактивная нагрузка» [9, с. 10].

Среднесменная нагрузка для каждого цеха определяется по формулам:

$$P_c = K_u \cdot P_n, \quad (2.4)$$

$$Q_c = K_u \cdot P_n \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (2.5)$$

где K_u – коэффициент использования; P_n – номинальная активная мощность этой группы, приведенная к ПВ = 100%; $\operatorname{tg} \varphi$ – коэффициент реактивной мощности рассматриваемой группы электроприемников.

Значения коэффициента максимума определяются по справочной литературе.

Полная расчетная нагрузка по каждому из цехов предприятия находится по выражению:

$$S_P = \sqrt{P_P^2 + Q_P^2}. \quad (2.6)$$

Расчеты для высоковольтных электроприемников выполняем аналогичным образом.

Итоговые значения среднесменной и расчетной мощности по предприятию в целом получаем путем сложения итоговых значений нагрузок 0,4 кВ и высоковольтной нагрузки 6-10 кВ.

Результаты определения электрических нагрузок по цехам предприятия сводим в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Расчет ожидаемых максимальных электрических нагрузок по цехам

№ цеха на плане предприятия	P_n , кВт	$P_{н.э.}$, кВт	n_{ε}	K_u	$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	P_C , кВт	Q_C , квар	K_M	P_P , кВт	Q_P , квар	S_P , кВА
1	408	17.74	23	0.36	0.6	1.33	146.88	195.84	1.24	182.13	195.84	267.44
2	1690	88.95	19	0.46	0.77	0.83	777.4	644.18	1.26	979.52	644.18	1172.36
3	620	24.80	25	0.41	0.72	0.96	254.2	245.01	1.22	310.12	245.01	395.23
4	465	77.50	6	0.32	0.73	0.94	148.8	139.31	2.15	319.92	153.24	354.73
5	1830	83.18	22	0.48	0.81	0.72	878.4	635.95	1.21	1062.86	635.95	1238.59
6	15	3.75	4	0.21	0.72	0.96	3.15	3.04	2.65	8.35	3.34	8.99
7	125	10.42	12	0.62	0.83	0.67	77.5	52.08	1.25	96.88	52.08	109.99

Продолжение таблицы 2.1

№ цеха на плане предприятия	P_n , кВт	$P_{н.э.}$, кВт	$n_э$	K_u	$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	P_c , кВт	Q_c , квар	K_M	P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА
8	390	48.75	8	0.78	0.77	0.83	304.2	252.07	1.15	349.83	277.28	446.39
9	55	13.75	4	0.72	0.86	0.59	39.6	23.50	1.3	51.48	25.85	57.60
10	34	2.62	13	0.63	0.82	0.70	21.42	14.95	1.25	26.78	14.95	30.67
11	1825	86.90	21	0.48	0.77	0.83	876	725.88	1.25	1095.00	725.88	1313.74
12	3800	165.22	23	0.37	0.64	1.20	1406	1688.02	1.28	1799.68	1688.02	2467.44
13	212	16.31	13	0.72	0.77	0.83	152.64	126.48	1.16	177.06	126.48	217.60
Итого по 0,4 кВ	11469	2.6...165.2	193	0.44	-	0.93	5086.2	4746.31	-	6459.61	4788.10	8040.68

Продолжение таблицы 2.1

№ цеха на плане предприятия	P_n , кВт	$P_{н.э.}$, кВт	$n_э$	K_u	$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	P_C , кВт	Q_C , квар	K_M	P_P , кВт	Q_P , квар	S_P , кВА
9	2520	630	4	0.82	0.88	-0.54	2066.4	-1115.3	1.17	2417.6	-1115.3	2662.5
13	3200	800	4	0.78	0.88	-0.54	2496	-1347.2	1.19	2970.2	-1347.2	3261.4
Итого по 10 кВ	5720	630...800	8	0.80	-	-0.54	4562.4	-2462.5	-	5387.9	-2462.5	5924.0
Всего по предприятию	17189	2.6...800	201	0.56	-	0.24	9648.6	2283.7	-	11847.5	2325.57	12073.6

3 Выбор числа и номинальной мощности силовых трансформаторов КТП

3.1 Выбор трансформаторов КТП для электроснабжения цеха №12

Найдем необходимую мощность силового трансформатора КТП по формуле [10, 11]:

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

$$S_{HT} > \frac{1799.7}{0.7 \cdot 2} = 1285 \text{ кВА}.$$

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

3.1.1 Вариант с силовым трансформатором ТСЗЛ -1600

По данным производителя силового трансформатора определяем его паспортные данные: $\Delta P_{XX} = 2.2 \text{ кВт}$, $\Delta P_{K3} = 16.6 \text{ кВт}$, $i_{XX} = 0.5 \%$, $u_{K3} = 6 \%$, $K_T = 733.7 \text{ тыс. руб.}$

Произведем расчет потерь в трансформаторе [12, 13]:

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

$$\Delta P_{mp} = 2 \cdot (2.2 + 0.7^2 \cdot 16.6) = 20.67 \text{ кВт},$$

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

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

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

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

$$P_p = 1799.7 + 20.67 = 1820.3 \text{ кВт},$$

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

$$Q_p = 1688 + 110.08 = 1798.1 \text{ квар.}$$

Рассчитаем реактивную мощность в период минимальных нагрузок:

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

$$Q_{\min} = 0.5 \cdot 1798.1 = 899.1 \text{ квар.}$$

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

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

$$Q'_{\text{э1}} = 1798.1 - 0.7 \cdot 0 = 1798.1 \text{ квар.},$$

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

$$Q''_{\text{э1}} = 0.28 \cdot 1820.3 = 509.7 \text{ квар.}$$

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

Принимаем наименьшее значение $Q_{\text{э1}} = 509.7 \text{ квар.}$

Определим экономически целесообразные значения реактивной мощности в часы минимальных нагрузок:

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

$$Q_{\text{э2,е}} = 899.1 - (1798.1 - 509.7) = -389.4 \text{ квар.};$$

$$Q_{\varepsilon 2, H} = Q_{\min} + Q_K, \quad (3.10)$$

$$Q_{\varepsilon 2, H} = 899.1 + 0 = 899.1 \text{ квар};$$

где $Q_K = 0$.

Из-за повышенного уровня напряжения в период минимального потребления мощности принимаем наибольшее значение: $Q_{\varepsilon 2} = 899.1 \text{ квар}$.

Определяем суммарное значение мощности конденсаторных установок:

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

$$Q_{KY \max} = 1,15 \cdot 1798.1 - 509.7 = 1558.1 \text{ квар}.$$

Из них мощность нерегулируемых КУ составит:

$$Q_{KY \min} = Q_{\min} - Q_{\varepsilon 2}, \quad (3.12)$$

$$Q_{KY \min} = 899.1 - 899.1 = 0.$$

То есть все КУ должны регулироваться.

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

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

$$Q_{\varepsilon H} = 509.7 - (1798.1 - 1688) = 399.6 \text{ квар}.$$

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

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

$$Q_T = \sqrt{(2 \cdot 0.7 \cdot 1600)^2 - 1799.7^2} = 1333.7 \text{ квар},$$

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

$$Q_{KVH} = 1688 - 1333.7 = 354.3 \text{ квар},$$

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

$$Q_{.KVB} = 1558.1 - 354.3 = 1203.8 \text{ квар}.$$

Принимаем к установке цеховую КТП с двумя силовыми трансформаторами ТСЗЛ -1600/10, двумя конденсаторными установками 0,4 кВ типа АУКРМ 175 квар и двумя конденсаторными установками 10,5 кВ типа УКРП57 600 квар.

Определим продолжительность периода максимальных потерь

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

$$\tau = \left(0,124 + \frac{6951}{10000} \right)^2 \cdot 8760 = 5877.3 \text{ ч.}$$

Определим удельную стоимость потерь на холостом ходу в силовом трансформаторе:

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

$$C_{XX} = \left(\frac{611 \cdot 12}{6951} + 1.19 \right) \cdot 8760 = 19.665 \text{ тыс.руб/кВт}.$$

Определим удельную стоимость потерь короткого замыкания в силовом трансформаторе:

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

$$C_{K3} = \left(\frac{611 \cdot 12}{6951} + 1.19 \right) \cdot 5877.3 = 13.193 \text{ тыс.руб/кВт}.$$

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

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

$$C \cdot \Delta P_T = 19.665 \cdot 2.2 + 13.193 \cdot 0.7^2 \cdot 16.6 = 150.557 \text{ тыс.руб.}$$

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

$$Z_{КТП} = E \cdot (K_T \cdot N_T + K_{KY6} \cdot N_{KY6} + K_{KYH} \cdot N_{KYH}) + C \cdot \Delta P \cdot N_T, \quad (3.21)$$

$$Z_{КТП} = 0.223 \cdot (733.7 \cdot 2 + 201.4 \cdot 2 + 67 \cdot 2) + (150.577 \cdot 2) = 748.091 \text{ тыс.руб.}$$

3.1.2 Вариант с силовым трансформатором ТСЗЛ -2500

По данным производителя силового трансформатора определяем его паспортные данные: $\Delta P_{XX} = 2.85 \text{ кВт}$, $\Delta P_{K3} = 27.1 \text{ кВт}$, $i_{XX} = 0.5 \%$, $u_{K3} = 6 \%$, $K_T = 1114.6 \text{ тыс. руб.}$.

Произведем расчет потерь в трансформаторе:

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

$$\Delta P_{mp} = 2 \cdot (2.85 + 0.7^2 \cdot 27.1) = 32.26 \text{ кВт},$$

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

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

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

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

$$P_p = 1799.7 + 32.26 = 1831.9 \text{ кВт},$$

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

$$Q_p = 1688 + 172 = 1860 \text{ квар.}$$

Рассчитаем реактивную мощность в период минимальных нагрузок:

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

$$Q_{\min} = 0.5 \cdot 1860 = 930 \text{ квар.}$$

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

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

$$Q'_{\text{э1}} = 1860 - 0.7 \cdot 0 = 1860 \text{ квар},$$

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

$$Q''_{\text{э1}} = 0.28 \cdot 1831.9 = 512.9 \text{ квар.}$$

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

Принимаем наименьшее значение $Q_{\text{э1}} = 512.9 \text{ квар}$.

Определим экономически целесообразные значения реактивной мощности в часы минимальных нагрузок:

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

$$Q_{\text{э2,в}} = 930 - (1860 - 512.9) = -417.1 \text{ квар};$$

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

$$Q_{\varepsilon 2, H} = 930 + 0 = 930 \text{ квар};$$

где $Q_{\kappa} = 0$.

Из-за повышенного уровня напряжения в период минимального потребления мощности принимаем наибольшее значение: $Q_{\varepsilon 2} = 930 \text{ квар}$.

Определяем суммарное значение мощности конденсаторных установок:

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

$$Q_{\kappa y \max} = 1,15 \cdot 1860 - 512,9 = 1626,1 \text{ квар}.$$

Из них мощность нерегулируемых КУ составит:

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

$$Q_{\kappa y \min} = 930 - 930 = 0.$$

То есть все КУ должны регулироваться.

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

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

$$Q_{\varepsilon H} = 512,9 - (1860 - 1688) = 340,9 \text{ квар}.$$

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

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

$$Q_T = \sqrt{(2 \cdot 0.7 \cdot 2500)^2 - 1799.7^2} = 3001.9 \text{ квар},$$

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

$$Q_{KVH} = 1688 - 3001.9 = -1313.8 < 50 \text{ квар},$$

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

$$Q_{.KVB} = 1626.1 - 0 = 1626.1 \text{ квар}.$$

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

Принимаем к установке цеховую КТП с двумя силовыми трансформаторами ТСЗЛ-2500/10 и двумя конденсаторными установками 10,5 кВ типа УКРП57 900 квар.

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

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

$$C \cdot \Delta P_T = 19.665 \cdot 2.85 + 13.193 \cdot 0.7^2 \cdot 27.1 = 231.24 \text{ тыс.руб.}$$

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

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

$$З_{КТП} = 0.223 \cdot (1114.6 \cdot 2 + 217.9 \cdot 2) + (231.24 \cdot 2) = 1056.774 \text{ тыс.руб.}$$

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

Для остальных цехов предприятия выбор трансформаторов КТП производим аналогичным образом.

4 Выбор числа и номинальной мощности силовых трансформаторов на главной понизительной подстанции предприятия

Величину рационального напряжения питания предприятия можно определить по формуле [14, 15]:

$$U_{РАЦ} = 4.34 \cdot \sqrt{L + 0.016 \cdot P_{PI}}, \quad (4.1)$$
$$U_{РАЦ} = 4.34 \cdot \sqrt{17 + 0.016 \cdot 87193} = 163 \text{ кВ},$$

где расчетная активная нагрузка предприятия определяется:

$$P_{PI} = P_{PH} + P_{PB} + P_{CТОР}, \quad (4.2)$$
$$P_{PI} = 6459.61 + 5387.93 + 75345 = 87193 \text{ кВт}.$$

Полную расчетную нагрузку предприятия определим по формуле:

$$S_{PI} = \sqrt{P_{PI}^2 + Q_{ЭC}^2}, \quad (4.3)$$
$$S_{PI} = \sqrt{87193^2 + 21798^2} = 89876 \text{ кВА},$$

где величину расчетной реактивной нагрузки предприятия найдем по формуле:

$$Q_{ЭC} = P_{PI} \cdot \operatorname{tg} \phi, \quad (4.4)$$
$$Q_{ЭC} = 87193 \cdot 0.25 = 21798 \text{ квар}.$$

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

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

$$S_{номт} \approx 0,8 \cdot 89876 \cdot \frac{1}{1,4} = 51358 \text{ кВА.}$$

По шкале номинальных мощностей силовых трансформаторов и каталогу производителя выбираем для дальнейшего рассмотрения два варианта: трансформаторы ТРДН-63000/110/10 и следующий по шкале номинальных мощностей ТРДН-80000/110/10/10.

4.1 Вариант установки на ГПП предприятия двух силовых трансформаторов ТРДН -63000/110/10

По сайту производителя силового трансформатора определяем его паспортные данные: $\Delta P_{xx} = 51 \text{ кВт}$, $\Delta P_{кз} = 246 \text{ кВт}$, $i_{xx} = 0.51\%$, $u_{кз} = 10.5\%$, $K_T = 49412 \text{ тыс. руб.}$

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

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

$$\Delta P_x' = 51 + 0.05 \cdot 321.3 = 67.07 \text{ кВт},$$

где

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

$$\Delta Q_x = 0.51 + 63000 / 100 = 321.3 \text{ квар},$$

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

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

- для обмотки напряжением 110 кВ по формулам:

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

$$\Delta Q_{к.в} = 1.3 \cdot 63000 / 100 = 826.9 \text{ квар},$$

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

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

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

$$\Delta P'_{к.в} = 0 + 0.05 \cdot 826.9 = 41.3 \text{ кВт}.$$

$$\Delta P_{к.в} = 0.$$

- для обмотки напряжением 10 кВ по формулам:

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

$$\Delta Q_{к.н1} = \Delta Q_{к.н2} = 18.375 \cdot 63000 / 100 = 11576.3 \text{ квар},$$

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

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

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

$$\Delta P'_{к.н1} = \Delta P'_{к.н2} = 492 + 0.05 \cdot 11576.3 = 1070.8 \text{ кВт},$$

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

$$\Delta P_{к.н1,2} = 2 \cdot 246 = 492 \text{ кВт}.$$

Значение коэффициентов загрузки каждой из обмоток трансформатора найдем по формуле:

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

$$K_{3.6} = \frac{89876}{63000} = 1.43.$$

$$K_{3.H1} = K_{3.H2} = \frac{S_{H1,2}}{S_{ном,T}}, \quad (4.16)$$

$$K_{3.H1} = K_{3.H2} = \frac{44938}{63000} = 0.71.$$

Найдем значение приведенных потерь активной мощности в силовом трансформаторе по формуле [16]:

$$P_m = \Delta P_x + K_{3.6}^2 \cdot \Delta P_{к.6} + K_{3.H1}^2 \cdot \Delta P_{к.H1} + K_{3.H2}^2 \cdot \Delta P_{к.H2}, \quad (4.17)$$

$$P_m = 67.07 + 1.43^2 \cdot 41.3 + 0.71^2 \cdot 1070.8 + 0.71^2 \cdot 1070.8 = 1240.9 \text{ кВт}.$$

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

$$\Delta W_{nc} = \sum \Delta W_{xi} + \sum \Delta W_{ki} = \sum n_i \cdot \Delta P'_x \cdot T_i + \\ + \sum \left(\frac{1}{n_i} \cdot K_{3.6i}^2 \cdot \Delta P'_{к.6} \cdot T_i + \frac{1}{n_i} \cdot K_{3.H1i}^2 \cdot \Delta P'_{к.H1} \cdot T_i + \frac{1}{n_i} \cdot K_{3.H2i}^2 \cdot \Delta P'_{к.H2} \cdot T_i \right) \quad (4.18)$$

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

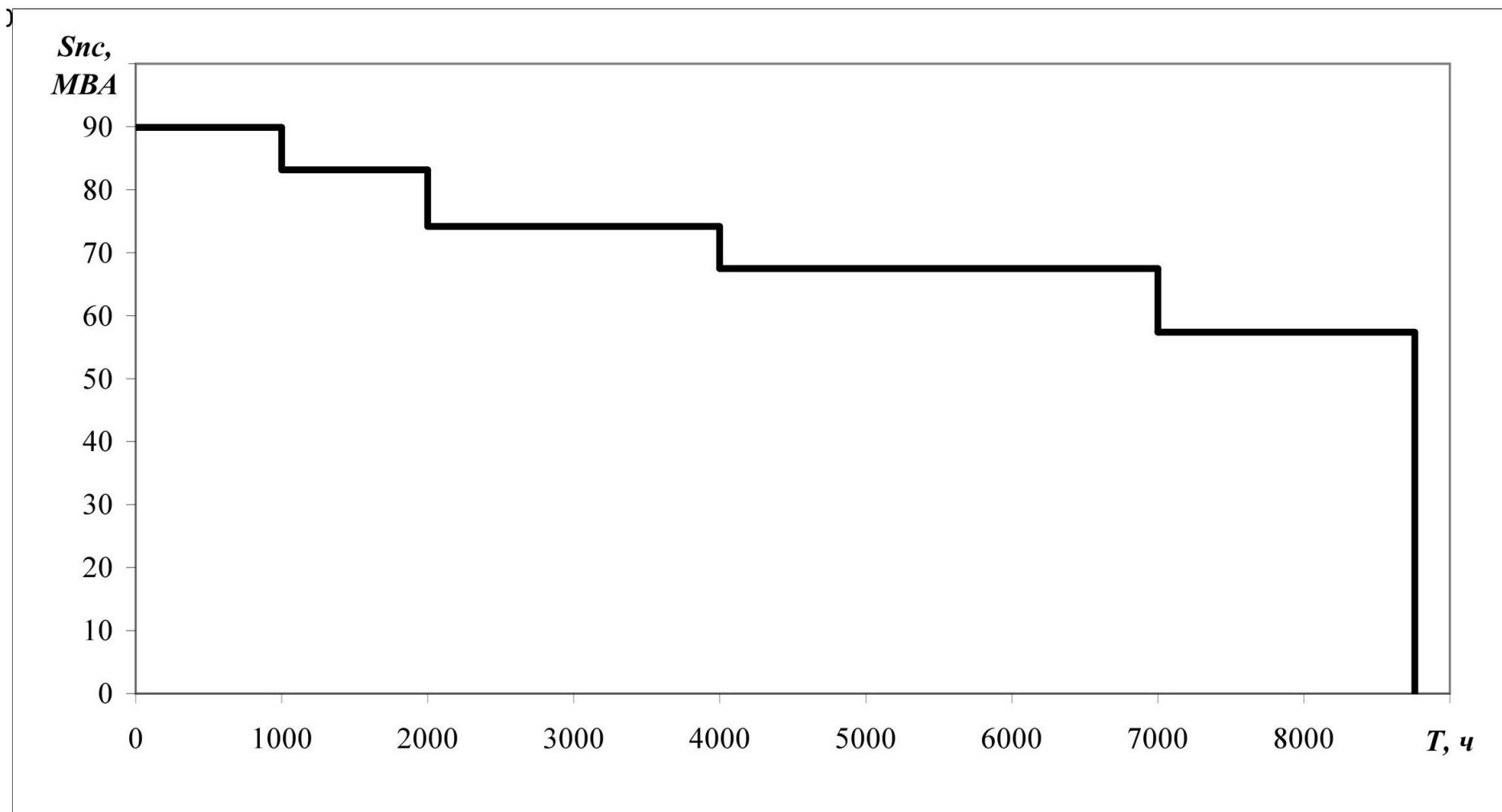


Рисунок 4.1 – Суммарный годовой график нагрузки подстанции предприятия

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

i	$S_{Bi},$ MBA	$S_{H1i},$ MBA	$S_{H2i},$ MBA	n_i	$T_i, \text{ ч}$	$\Delta W_{xi},$ $\kappa Bm \cdot \text{ч}$	K_{3Bi}	K_{3H1i}	K_{3H2i}	$\Delta W_{\kappa Bi},$ $\kappa Bm \cdot \text{ч}$	$\Delta W_{\kappa H1i},$ $\kappa Bm \cdot \text{ч}$	$\Delta W_{\kappa H2i},$ $\kappa Bm \cdot \text{ч}$
1	89.876	44.938	44.938	2	1000	134130	1.427	0.713	0.713	42071	272414	272414
2	83.157	41.578	41.578	2	1000	134130	1.320	0.660	0.660	36016	233206	233206
3	74.171	37.086	37.086	2	2000	268260	1.177	0.589	0.589	57306	371058	371058
4	67.460	33.730	33.730	2	3000	402390	1.071	0.535	0.535	71107	460419	460419
5	57.354	28.677	28.677	2	1760	236069	0.910	0.455	0.455	30154	195249	195249
$\Sigma \Delta W_{xi} = 1174979$										$\Sigma \Delta W_{\kappa Bi} = 3301345$		

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

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

$$I_{\Delta W_{ПТС}} = (3301345 + 1174979) \cdot 2.245 = 10049 \text{ тыс. руб.}$$

где $C_{\vartheta} = 2.245 \text{ руб} / \text{кВт} \cdot \text{ч}$ - стоимость 1 кВт·ч потерь электрической энергии.

Определим значение суммарных приведенных затрат на ГПП по формуле:

$$Z_{прив} = E_n \cdot K + I = E_n \cdot K + I_{\vartheta} + I_{\Delta W_{ПТС}}, \quad (4.20)$$

$$Z_{прив} = 0.25 \cdot 98823.27 + 9289 + 10049 = 44045 \text{ тыс. руб.}$$

где $K = 2 \cdot 49411.63 = 98823.27 \text{ тыс. руб.}$ – цена за два силовых трансформатора ТРДН-63000/110;

$$I_{\vartheta} = P_{\text{сум}} \cdot K = 0,094 \cdot 98823.27 = 9289 \text{ тыс. руб.}$$
 – годовые отчисления.

4.2 Вариант установки на ГПП предприятия двух силовых трансформаторов ТРДН -80000/110/10

По сайту производителя силового трансформатора определяем его паспортные данные: $\Delta P_{XX} = 59 \text{ кВт}$, $\Delta P_{K3} = 311 \text{ кВт}$, $i_{XX} = 0.46 \%$, $u_{K3} = 10.5 \%$, $K_T = 56599 \text{ тыс. руб.}$

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

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

$$\Delta P'_x = 59 + 0.05 \cdot 368 = 77.4 \text{ кВт},$$

где

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

$$\Delta Q_x = 0.46 + 80000 / 100 = 368 \text{ квар},$$

$$K_{un} = 0.05 \text{ кВт} / \text{квар}.$$

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

- для обмотки напряжением 110 кВ по формулам:

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

$$\Delta Q_{к.в} = 1.3 \cdot 80000 / 100 = 1050 \text{ квар},$$

$$U_{к.в\%} = 0.125 \cdot u_{к.ВН-НН}, \quad (4.24)$$

$$U_{к.в\%} = 0.125 \cdot 10.5 = 1.3 \%,$$

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

$$\Delta P'_{к.в} = 0 + 0.05 \cdot 1050 = 52.5 \text{ кВт}.$$

$$\Delta P_{к.в} = 0.$$

- для обмотки напряжением 10 кВ по формулам:

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

$$\Delta Q_{к.н1} = \Delta Q_{к.н2} = 18.375 \cdot 80000 / 100 = 14700 \text{ квар},$$

$$U_{к.н1\%} = U_{к.н2\%} = 1.75 \cdot u_{к.ВН-НН}, \quad (4.27)$$

$$U_{к.н1\%} = U_{к.н2\%} = 1.75 \cdot 10.5 = 18.375 \%,$$

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

$$\Delta P'_{к.н1} = \Delta P'_{к.н2} = 622 + 0.05 \cdot 14700 = 1357 \text{ кВт},$$

$$\Delta P_{\kappa.H1,2} = 2 \cdot \Delta P_{\kappa.BH-HH}, \quad (4.29)$$

$$\Delta P_{\kappa.H1,2} = 2 \cdot 311 = 622 \text{ кВт}.$$

Значение коэффициентов загрузки каждой из обмоток трансформатора найдем по формуле:

$$K_{3.6} = \frac{S_B}{S_{ном,T}}, \quad (4.30)$$

$$K_{3.6} = \frac{89876}{80000} = 1.12.$$

$$K_{3.H1} = K_{3.H2} = \frac{S_{H1,2}}{S_{ном,T}}, \quad (4.31)$$

$$K_{3.H1} = K_{3.H2} = \frac{44938}{80000} = 0.56.$$

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

$$P_m = \Delta P_x + K_{3.6}^2 \cdot \Delta P_{\kappa.6} + K_{3.H1}^2 \cdot \Delta P_{\kappa.H1} + K_{3.H2}^2 \cdot \Delta P_{\kappa.H2}, \quad (4.32)$$

$$P_m = 77.4 + 1.12^2 \cdot 52.5 + 0.56^2 \cdot 1357 + 0.56^2 \cdot 1357 = 1000 \text{ кВт}.$$

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

$$\Delta W_{nc} = \sum \Delta W_{xi} + \sum \Delta W_{ki} = \sum n_i \cdot \Delta P'_x \cdot T_i + \\ + \sum \left(\frac{1}{n_i} \cdot K_{3.6i}^2 \cdot \Delta P'_{\kappa.6} \cdot T_i + \frac{1}{n_i} \cdot K_{3.H1i}^2 \cdot \Delta P'_{\kappa.H1} \cdot T_i + \frac{1}{n_i} \cdot K_{3.H2i}^2 \cdot \Delta P'_{\kappa.H2} \cdot T_i \right) \quad (4.33)$$

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

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

$$I_{\Delta W_{ПТС}} = \Delta W_{nc} \cdot C_{\vartheta}, \quad (4.34)$$

$$I_{\Delta W_{ПТС}} = (2594907 + 1356048) \cdot 2.245 = 8870 \text{ тыс. руб.}$$

где $C_{\vartheta} = 2.245 \text{ руб} / \text{кВт} \cdot \text{ч}$ - стоимость 1 кВт·ч потерь электрической энергии.

Определим значение суммарных приведенных затрат на ГПП по формуле:

$$Z_{прив} = E_n \cdot K + I = E_n \cdot K + I_{\vartheta} + I_{\Delta W_{ПТС}}, \quad (4.35)$$

$$Z_{прив} = 0.25 \cdot 113197.6 + 10641 + 8870 = 47810 \text{ тыс.руб.}$$

где $K = 2 \cdot 56598.78 = 113197.6 \text{ тыс.руб.}$ – цена за два силовых трансформатора ТРДН-80000/110/10/10;

$$I_{\vartheta} = P_{\text{сум}} \cdot K = 0,094 \cdot 113197.6 = 10641 \text{ тыс.руб.} - \text{годовые отчисления.}$$

По минимальным приведенным затратам выбираем к установке на ГПП вариант с установкой двух силовых трансформаторов ТРДН- 63000/110/10/10.

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

i	$S_{Bi},$ MBA	$S_{H1i},$ MBA	$S_{H2i},$ MBA	n_i	$T_i, \text{ ч}$	$\Delta W_{xi},$ $\kappa Bm \cdot \text{ч}$	K_{3Bi}	K_{3H1i}	K_{3H2i}	$\Delta W_{\kappa Bi},$ $\kappa Bm \cdot \text{ч}$	$\Delta W_{\kappa H1i},$ $\kappa Bm \cdot \text{ч}$	$\Delta W_{\kappa H2i},$ $\kappa Bm \cdot \text{ч}$
1	89.876	44.938	44.938	2	1000	154800	1.123	0.562	0.562	33131	214090	214090
2	83.157	41.578	41.578	2	1000	154800	1.039	0.520	0.520	28363	183276	183276
3	74.171	37.086	37.086	2	2000	309600	0.927	0.464	0.464	45128	291614	291614
4	67.460	33.730	33.730	2	3000	464400	0.843	0.422	0.422	55996	361843	361843
5	57.354	28.677	28.677	2	1760	272448	0.717	0.358	0.358	23746	153446	153446
$\Sigma \Delta W_{xi} = 1356048$										$\Sigma \Delta W_{\kappa Bi} = 2594907$		

5 Выбор схемы внутриводского электроснабжения

Когда потребителей электроэнергии достаточно много и радиальные схемы становятся нецелесообразными из-за наличия множества звеньев коммутации, в распределительных сетях 6-10 кВ применяются магистральные схемы. Число цеховых трансформаторов запитанных от одной магистрали, зависит от их номинальной мощности и требований по надежности электроснабжения электроприемников. Как правило, магистральные схемы применяются для запитки от одной магистральной линии до 5-6 трансформаторных подстанций с общей установленной мощностью силовых трансформаторов не более 5-6 МВА. Магистральные схемы по сравнению с радиальными обладают меньшей надежностью, но дают возможность уменьшить число коммутационных аппаратов высокого напряжения.

Одной из разновидностей магистральных схем являются схемы двойных сквозных магистралей, которые могут использоваться для питания потребителей любой категории по надежности электроснабжения. Повышение надежности достигается тем, что все первые трансформаторы каждой КТП подключаются к первой секции РУ 6-10 кВ, а вторые - ко второй секции. Таким образом, при повреждении одной из питающих магистральных линий напряжением 6-10 кВ электрическая энергия поступает к потребителям по второй, оставшейся в работе, магистральной линии с помощью автоматических переключений на секциях 0,4 кВ всех КТП. Эти переключения осуществляются посредством устройства АВР за время порядка 0,1 - 0,2 с, что мало сказывается на работе электроприемников. Существенным преимуществом схем двойных сквозных магистралей является значительное уменьшение количества коммутационных аппаратов в РУ напряжением 6-10 кВ и числа питающих кабелей, что уменьшает стоимость и упрощает схемы распределительной сети. Такие схемы высоконадежны и применяются при наличии нагрузок первой и второй категории по надежности электроснабжения на двухтрансформаторных подстанциях, имеющих две секции на низшем уровне напряжения [17, 18].

6 Определение значений тока КЗ

Для определения значений токов короткого замыкания составляем две схемы: расчетную, которая представлена на рисунке 6.1 и схему замещения, которая представлена на рисунке 6.2.

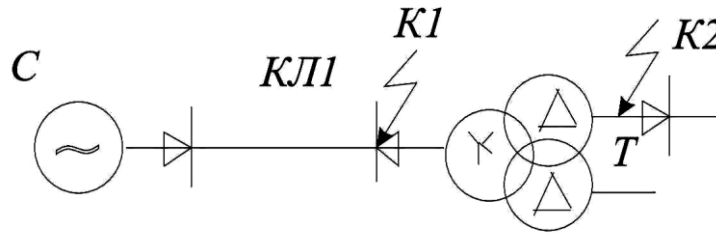


Рисунок 6.1 - Расчётная схема для определения значений тока короткого замыкания

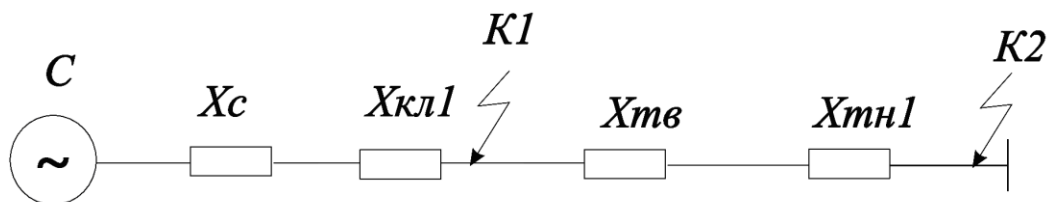


Рисунок 6.2 - Схема замещения для определения значений тока короткого замыкания

Параметры, необходимые для определения значений токов КЗ:

Параметры внешней ЭЭС: $U_{cp} = 115$ кВ; $S_{\sigma} = 1000$ МВА; $S_{\kappa} = 4400$ МВА.

Параметры питающей кабельной линии электропередачи:
 $x_{yo} = 0,4$ Ом/км; $L = 17$ км.

Параметры выбранного к установке на ГПП силового трансформатора:
 $S_{н} = 63$ МВА; $U_{\kappa} = 10.5$ %.

Определим сопротивление системы по формуле:

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

$$x_{c.\bar{o}} = \frac{1000}{4400} = 0.227.$$

Определим сопротивление воздушной линии электропередачи по формуле:

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

$$x_{BЛ.\bar{o}} = \frac{0.4}{2} \cdot 17 \cdot \frac{1000}{115^2} = 0.257.$$

Определим сопротивление принятого к установке на ГПП силового трансформатора ТРДН-63000/110/10/10 по формуле:

$$x_{T.B.\bar{o}} = \frac{U_{\kappa.6}, \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_H}; \quad (6.3)$$

$$x_{T.B.\bar{o}} = \frac{1.3125}{100} \cdot \frac{1000}{63} = 0.208.$$

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

$$x_{T.H.\bar{o}} = \frac{18.375}{100} \cdot \frac{1000}{63} = 2.917.$$

6.1 Расчет для точки К1

Определим суммарное сопротивление цепи:

$$x_{рез1} = x_{c.\bar{o}} + x_{BЛ.\bar{o}}; \quad (6.5)$$

$$x_{рез1} = 0.227 + 0.257 = 0.484.$$

Найдем значение базисного тока:

$$I_{\bar{o}.k1} = \frac{S_{\bar{o}}}{\sqrt{3} \cdot U_{cn}}; \quad (6.6)$$

$$I_{\bar{o}.k1} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 5.02 \text{ кА.}$$

Определим начальное действующее значение трехфазного тока короткого замыкания по формуле:

$$I_{k1}^{(3)} = \frac{E_{\bar{o}}}{x_{pez1}} \cdot I_{\bar{o}}; \quad (6.7)$$

$$I_{k1}^{(3)} = \frac{1}{0.484} \cdot 5.02 = 10.365 \text{ кА.}$$

Определим значение ударного тока КЗ:

$$i_{y\bar{o}.k1} = \sqrt{2} \cdot I_{n,o}^{(3)} \cdot \kappa_{y\bar{o}}; \quad (6.8)$$

$$i_{y\bar{o}.k1} = \sqrt{2} \cdot 10.365 \cdot 1.8 = 26.385 \text{ кА.}$$

6.2 Расчет для точки К2

Определим суммарное сопротивление цепи:

$$x_{pez2} = x_{pez1} + x_{T.B.\bar{o}} + x_{T.H.\bar{o}}; \quad (6.9)$$

$$x_{pez2} = 0.484 + 0.208 + 2.917 = 3.609.$$

Найдем значение базисного тока:

$$I_{\sigma.\kappa 2} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{сн}}}; \quad (6.10)$$

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

Определим начальное действующее значение трехфазного тока короткого замыкания по формуле:

$$I_{\kappa 2}^{(3)} = \frac{E_{\sigma}}{x_{\text{рез}2}} \cdot I_{\sigma.\kappa 2}; \quad (6.11)$$

$$I_{\kappa 2}^{(3)} = \frac{1}{3.609} \cdot 54.986 = 15.234 \text{ кА.}$$

Определим значение ударного тока КЗ:

$$i_{\text{уд}.\kappa 2} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{н},o}^{(3)} \cdot \kappa_{\text{уд}}; \quad (6.12)$$

$$i_{\text{уд}.\kappa 2} = \sqrt{2} \cdot 15.234 \cdot 1.85 = 39.857 \text{ кА.}$$

Результаты определения значений токов короткого замыкания заносим в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты определения значений токов короткого замыкания

№ точки КЗ	$U_{\text{сн}}$, кВ	$\kappa_{\text{уд}}$	$I_{\kappa}^{(3)}$, кА	$i_{\text{уд}}$, кА
1	115	1.8	10.4	26.4
2	10.5	1.85	15.2	39.8

7 Выбор основного электрооборудования ГПП

7.1 Выбор электрических аппаратов на стороне 110 кВ

7.1.1 Выбор разъединителя

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

Разъединитель выбираем и проверяем по следующим условиям:

- уровню номинального напряжения [19, 20]:

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

- значению номинального тока:

$$\begin{aligned} I_{max} &< I_n, \\ 443 \text{ А} &< 1250 \text{ А}, \end{aligned} \quad (7.2)$$

где

$$\begin{aligned} I_{max} &= 1.4 \cdot \frac{S_{н.Т}}{\sqrt{3} \cdot U_{сн}}, \\ I_{max} &= 1.4 \cdot \frac{63000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 443 \text{ А}; \end{aligned} \quad (7.3)$$

- электродинамической стойкости:

$$\begin{aligned} i_{уд} &\leq i_{нр.с}, \\ 26.4 \text{ кА} &\leq 73 \text{ кА}; \end{aligned} \quad (7.4)$$

- термической стойкости:

$$B_k \leq I_{np.c}^2 \cdot t_{np.c}, \quad (7.5)$$

$$15.7 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 59.4 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

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

7.1.2 Выбор трансформатора тока

На стороне высокого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем трансформатор тока типа ТВ-110-II-600/5.

Трансформатор тока выбирается и проверяется по:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (7.6)$$

$$110 \text{ кВ} \leq 110 \text{ кВ};$$

- значению номинального тока:

$$I_{\max} \leq I_{H.TT}, \quad (7.7)$$

$$443 \text{ А} \leq 600 \text{ А};$$

- электродинамической стойкости:

$$i_{уд} \leq i_{эдин.ст}, \quad (7.8)$$

$$36.4 \text{ кА} \leq 40 \text{ кА};$$

- термической стойкости:

$$B_{\kappa} \leq K_T^2 \cdot I_{1ном.}^2 \cdot t_{откл} = I_T^2 \cdot t_{откл},, \quad (7.9)$$

$$15.7 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 59.4 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

- величине вторичной нагрузки:

$$Z_2 \leq Z_{2ном} , \quad (7.10)$$

где $Z_2 \approx R_2$

$$R_2 = R_{приб} + R_{np} + R_{\kappa}, \quad (7.11)$$

К вторичной нагрузке трансформатора тока относится амперметр мощностью 0,2 ВА. Определим активное сопротивление прибора:

$$R_{приб} = \frac{S_{приб}}{I_2^2}, \quad (7.12)$$

$$R_{приб} = \frac{0.2}{5^2} = 0.008 \text{ Ом}.$$

Значение максимально допустимого сопротивления проводов составит:

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

$$R_{np} = 1.2 - 0.008 - 0.1 = 1.092 \text{ Ом}.$$

Определим минимально допустимое сечение медного провода:

$$s = \frac{\rho \cdot l_p}{R_{np}}, \quad (7.13)$$

$$s = \frac{0.0175 \cdot 60}{1.092} = 0.962 \text{ мм}^2.$$

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

Принятый к установке на стороне высокого напряжения на ГПП трансформатор тока типа ТВ-110-II-600/5 прошел необходимые проверки.

7.2 Выбор электрических аппаратов на стороне 10 кВ

7.2.1 Выбор высоковольтного выключателя

На стороне низкого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем ВВ типа ВБЭК-10-31,5/3150.

ВВ выбираем и проверяем по следующим условиям:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (7.14)$$

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- значению номинального тока:

$$I_{max} < I_n, \quad (7.15)$$

$$2425 \text{ А} < 3150 \text{ А},$$

где

$$I_{max} = 1.4 \cdot \frac{S_{н.Т}}{\sqrt{3} \cdot U_{сн}}, \quad (7.16)$$

$$I_{max} = 1.4 \cdot \frac{63000}{\sqrt{3} \cdot 10.5 \cdot 2} = 2425 \text{ А};$$

- коммутационной способности:

$$I_{\kappa 1}^{(3)} \leq I_{откл.н}, \quad (7.17)$$

$$15.2 \text{ кА} \leq 31.5 \text{ кА},$$

$$i_{a,\tau} \leq i_{a.н.}, \quad (7.18)$$

$$11 \text{ кА} \leq 17.8 \text{ кА},$$

где

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{\kappa 1}^{(3)} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}}, \quad (7.19)$$

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot 15.2 \cdot e^{\frac{-0.04}{0.06}} = 11 \text{ кА},$$

$$i_{a.н.} = \left(\sqrt{2} \cdot \beta_n / 100 \right) \cdot I_{откл.н}, \quad (7.20)$$

$$i_{a.н.} = \left(\sqrt{2} \cdot \frac{40}{100} \right) \cdot 31.5 = 17.8 \text{ кА},$$

- электродинамической стойкости:

$$I_{\kappa 1}^{(3)} \leq I_{пр.с}, \quad (7.21)$$

$$15.2 \text{ кА} \leq 31.5 \text{ кА};$$

$$i_{y\partial} \leq i_{пр.с}, \quad (7.22)$$

$$39.9 \text{ кА} \leq 60 \text{ кА};$$

- термической стойкости:

$$B_{\kappa} \leq I_{терм}^2 \cdot t_{откл}, \quad (7.23)$$

$$34.7 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 56.3 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Принятый к установке на стороне низкого напряжения на ГПП высоковольтный выключатель типа ВБЭК-10-31,5/3150 прошел необходимые проверки.

7.2.2 Выбор трансформатора тока

На стороне низкого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем трансформатор тока типа ТПШЛ-10-I-3000/5.

Трансформатор тока выбирается и проверяется по:

- уровню номинального напряжения:

$$\begin{aligned} U_{сети} &\leq U_n, \\ 10 \text{ кВ} &\leq 10 \text{ кВ}; \end{aligned} \quad (7.24)$$

- значению номинального тока:

$$\begin{aligned} I_{\max} &\leq I_{н.т.т}, \\ 2425 \text{ А} &\leq 3000 \text{ А}; \end{aligned} \quad (7.25)$$

- электродинамической стойкости:

$$\begin{aligned} i_{уд} &\leq i_{эдин.ст}, \\ 39.9 \text{ кА} &\leq 100 \text{ кА}; \end{aligned} \quad (7.26)$$

- термической стойкости:

$$\begin{aligned} B_k &\leq K_T^2 \cdot I_{ном.}^2 \cdot t_{откл} = I_T^2 \cdot t_{откл}, \\ 34.7 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} &\leq 158.8 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}; \end{aligned} \quad (7.27)$$

- величине вторичной нагрузки:

$$Z_2 \leq Z_{2ном} , \quad (7.28)$$

где $Z_2 \approx R_2$

$$R_2 = R_{приб} + R_{np} + R_{\kappa} , \quad (7.29)$$

К вторичной нагрузке трансформатора тока на стороне низкого напряжения ГПП относятся амперметр, счетчик активной и реактивной энергии общей мощностью 12 ВА. Определим активное сопротивление приборов:

$$R_{приб} = \frac{S_{приб}}{I_2^2} , \quad (7.30)$$

$$R_{приб} = \frac{12}{5^2} = 0.48 \text{ Ом} .$$

Значение максимально допустимого сопротивления проводов составит:

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

$$R_{np} = 1.2 - 0.48 - 0.1 = 0.62 \text{ Ом} .$$

Определим минимально допустимое сечение медного провода:

$$s = \frac{\rho \cdot l_p}{R_{np}} , \quad (7.31)$$

$$s = \frac{0.0175 \cdot 40}{0.62} = 1.129 \text{ мм}^2 .$$

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

Принятый к установке на стороне низкого напряжения на ГПП трансформатор тока типа ТПШЛ-10-I-3000/5 прошел необходимые проверки.

По такому же принципу выбираем трансформаторы тока для отходящих линий.

7.2.3 Выбор трансформатора напряжения

На стороне высокого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем трансформатор напряжения типа НАМИ-10-95.

Трансформатор напряжения выбирается и проверяется по:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (7.32)$$

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- по классу точности;

- по величине вторичной нагрузки:

$$S_{2\Sigma} \leq S_{ном}, \quad (7.33)$$

$$S_{2\Sigma} = \sqrt{(\Sigma S_{приб} \cos \varphi)^2 + (\Sigma S_{приб} \sin \varphi)^2} = \sqrt{P_{приб}^2 + Q_{приб}^2}. \quad (7.34)$$

К вторичной нагрузке трансформатора напряжения относятся счетчики активной и реактивной электрической энергии с общей активной мощностью 64 Вт и 128 вар.

$$143 \text{ ВА} \leq 200 \text{ ВА}.$$

Принятый к установке на стороне низкого напряжения на ГПП трансформатор напряжения типа НАМИ-10-95 прошел необходимые проверки.

7.2.4 Выбор жестких шин

Выбор жестких шин осуществляем по экономической плотности тока:

$$s = \frac{I_{\text{раб. ном}}}{j_{\text{э}}}; \quad (7.35)$$

$$s = \frac{1732}{1} = 1732 \text{ мм}^2.$$

Выбираем две алюминиевые шины прямоугольного сечения с размерами 120x8 мм, с максимальным продолжительным током 2650 А.

Определим минимальное сечение шины по условию термической стойкости:

$$s_{\min} = \frac{\sqrt{B_K} \cdot 10^3}{C_T}, \quad (7.36)$$

$$s_{\min} = \frac{\sqrt{34.7} \cdot 10^3}{66} = 89.3 \text{ мм}^2.$$

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

$$F_{\max}^{(3)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{a} \cdot l \cdot i_{yd}^2 \cdot K_{\phi} \cdot K_p, \quad (7.37)$$

$$F_{\max}^{(3)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{1} \cdot 1 \cdot 39900^2 \cdot 1 \cdot 1 = 275.7 \text{ Н}.$$

Определим значение момента сопротивления поперечного сечения шины

по формуле:

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6}, \quad (7.38)$$

$$W = \frac{0.008 \cdot 0.12^2}{6} = 1.9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

Найдем значение максимального напряжения в материале проводника:

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}^{(3)} \cdot l}{\lambda \cdot W}, \quad (7.39)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{275.7 \cdot 1}{8 \cdot 1.9 \cdot 10^{-5}} \cdot 10^{-6} = 1.8 \text{ МПа}.$$

Проверим на электродинамическую стойкость:

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{доп}}, \quad (7.40)$$

$$1.8 \text{ МПа} \leq 247.1 \text{ МПа},$$

где

$$\sigma_{\text{доп}} = 0.7 \cdot \sigma_p, \quad (7.41)$$

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

Найдем значение момента инерции поперечного сечения проводника по формуле:

$$J = \frac{b \cdot h^3}{12}, \quad (7.42)$$

$$J = \frac{0.008 \cdot 0.12^3}{12} = 1.2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4.$$

Найдем значение частоты собственных колебаний по формуле:

$$f_0 = \frac{r_1^2}{2 \cdot \pi \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m}}; \quad (7.43)$$

$$f_0 = \frac{3.14^2}{2 \cdot \pi \cdot 1^2} \cdot \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 1.2 \cdot 10^{-6}}{2.5}} = 282 \text{ Гц}.$$

При частоте собственных колебаний более 200Гц отсутствует механический резонанс.

7.2.5 Выбор опорных изоляторов

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

Опорные изоляторы выбираются и проверяются по:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (7.44)$$

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- по максимально допустимой нагрузке на головку изолятора:

$$F_{\max}^{(3)} \leq F_{дон}, \quad (7.45)$$

$$275.7 \text{ Н} < 1436 \text{ Н},$$

где

$$F_{дон} = 0.6 \cdot F_{разруш} \cdot \frac{H_u}{H}, \quad (7.46)$$

$$F_{дон} = 0.6 \cdot 3750 \cdot \frac{0.12}{0.188} = 1436 \text{ Н}.$$

где

$$H = H_u + b + \frac{h}{2}, \quad (7.47)$$

$$H = 0.12 + 0.08 + \frac{0.12}{2} = 0.188 \text{ м.}$$

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

7.2.6 Выбор проходных изоляторов

Выбираем проходные изоляторы типа ИП-10/5000-42,5 УХЛ2.

Проходные выбираются и проверяются по:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (7.48)$$
$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- номинальному току:

$$I_{max} < I_n, \quad (7.49)$$
$$2425 \text{ А} < 5000 \text{ А};$$

- значению максимальной нагрузки на головку изолятора:

$$F_{расч} \leq 0.6 \cdot F_{разр}, \quad (7.50)$$
$$79.6 \text{ Н} < 25500 \text{ Н},$$

где

$$F_{расч} = 0.5 \cdot \frac{i_{y\partial}^2}{a} \cdot l_{уз} \cdot 10^{-7}, \quad (7.51)$$

$$F_{расч} = 0.5 \cdot \frac{39900^2}{1} \cdot 1 \cdot 10^{-7} = 79.6 \text{ Н}.$$

Принятые к установке на ГПП проходные изоляторы типа ИП-10/5000-42,5 УХЛ2 прошли необходимые проверки.

8 Расчет заземления ГПП

При времени отключения тока короткого замыкания 0.5 с максимально допустимое напряжение прикосновения равно 500 В [21].

Определим значение напряжения на заземлителе по формуле:

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

$$U_3 = \frac{500}{0.277} = 1804 \text{ В},$$

где коэффициент напряжения прикосновения определяется как:

$$\kappa_{II} = \frac{M\beta}{\left(\frac{l_\theta L_\epsilon}{a\sqrt{S}}\right)^{0.45}}, \quad (8.2)$$

$$\kappa_{II} = \frac{0.5 \cdot 0.96}{\left(\frac{7 \cdot 298}{14 \cdot \sqrt{1960}}\right)^{0.45}} = 0.277,$$

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

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

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

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

Сопrotивление заземляющего устройства должно удовлетворять условию:

$$R_3 < R_{3,доп}. \quad (8.4)$$

Определим число ячеек для расчетной модели заземлителя по формуле:

$$m = \frac{L_2}{2 \cdot \sqrt{S}} - 1, \quad (8.5)$$
$$m = \frac{298}{2 \cdot \sqrt{1960}} - 1 \approx 2.$$

Определим значение длины полос в расчетной модели по формуле:

$$L_2' = 2\sqrt{S}(m+1), \quad (8.6)$$
$$L_2' = 2\sqrt{1960} \cdot (2+1) = 265.6 \text{ м}.$$

Определим длину сторон ячейки по формуле:

$$b = \frac{\sqrt{S}}{m}, \quad (8.7)$$
$$b = \frac{\sqrt{1960}}{2} = 22.1 \text{ м}.$$

Определим число вертикальных заземлителей, которые необходимо установить по контуру:

$$n_{\text{г}} = \frac{\sqrt{S} \cdot 4}{1 \cdot l_{\text{г}}}, \quad (8.8)$$

$$n_{\epsilon} = \frac{\sqrt{1960} \cdot 4}{1 \cdot 7} \approx 25.$$

Определим общую протяженность вертикальных заземлителей:

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

$$L_{\epsilon} = 7 \cdot 25 = 175 \text{ м.}$$

Определим значение относительной глубины погружения вертикальных заземлителей по формуле:

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

$$\frac{7 + 0.7}{\sqrt{1960}} = 0.174.$$

Определим значение суммарного сопротивления для сложного заземлителя:

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

$$R_3 = 0.298 \cdot \frac{30}{\sqrt{1960}} + \frac{30}{298 + 175} = 0.27 \text{ Ом,}$$

где

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

$$A = (0.444 - 0.84 \cdot 0.174) = 0.298;$$

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

Заключение

В бакалаврской работе было осуществлено проектирование системы электроснабжения металлургического завода АО «ЛМЗ». В результате расчета нагрузок было установлено, что суммарная нагрузка предприятия составляет 12 МВА, а с учетом мощности прочих потребителей, получающих питание от ГПП предприятия 89 МВА. Для электроснабжения цеха №12 была выбрана цеховая трансформаторная подстанция с двумя силовыми трансформаторами ТСЗЛ - 1600/10/0,4. По суммарной нагрузке ГПП с учетом мощности сторонних потребителей было произведено технико-экономическое сравнение двух вариантов установки силовых трансформаторов на ГПП. По наименьшим приведенным затратам был выбран вариант с трансформаторами ТРДН - 63000/110/10/10. Для питания цеховых подстанций на предприятии была выбрана магистральная схема электроснабжения. Результаты расчета токов КЗ использовались при выборе и проверке оборудования ГПП. Были выбраны разъединители РГП-СЭЩ-110/1250, трансформаторы тока ТВ-110-II-600/5, высоковольтные выключатели ВБЭК-10-31,5/3150, трансформаторы тока ТПШЛ-10-I-3000/5, трансформаторы напряжения НАМИ-10-95 и т.д. Произведен расчет заземления ГПП.

Список используемых источников

1. Валеев И.М., Мусаев Т.А. Методика расчета режима работы системы электроснабжения городского района : монография. Казань : КНИТУ, 2016. 132 с.
2. Данилов М.И. Романенко И.Г. Инженерные системы зданий и сооружений (электроснабжение с основами электротехники) [Электронный ресурс] : учебное пособие (курс лекций). Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2015. 223 с. URL: <http://www.iprbookshop.ru/63087.html> (дата обращения: 14.03.2018).
3. Surya S., Wayne Beaty H. Standard Handbook for Electrical Engineers, Seventeenth Edition. - McGraw Hill Professional, 2017. 368 p.
4. Михайлов В.Е. Современная электросеть. СПб. : Наука и Техника, 2013. 256 с.
5. Хорольский В.Я., Таранов М.А., Петров Д.В. Технико-экономические расчеты распределительных электрических цепей: учебное пособие. М.: Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2015. 96 с.
6. Lukutin B. V., Shandarova E. B., Fuks I. L. Energy efficiency of photovoltaic power plants in stand-alone power supply systems // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Chelyabinsk. 2016. pp. 1-5.
7. Комков В.А., Тимахова Н.С. Энергосбережение в жилищно-коммунальном хозяйстве: учебное пособие, 2-е изд. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. 204 с.
8. Щербаков Е.Ф., Александров Д.С., Дубов А.Л. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях: учебное пособие. М.: Форум, 2014. 496 с.
9. Вахнина В.В., Черненко А.Н. Проектирование систем электроснабжения : электронное учеб.-метод. пособие. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2016. 78 с. URL:

https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/2976/1/Vahnina%20Chernenko_EUMI_Z.pdf (дата обращения: 14.03.2018).

10. Кулеева Л.И., Митрофанов С.В., Семенова Л.А. Проектирование подстанции : учебное пособие. Оренбург: Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2016. 111 с.
11. Chen C., Chen Y., Tan Y., Fang J., Luo F., Kang Y. On the Practical Design of a High Power Density SiC Single-Phase Uninterrupted Power Supply System // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2017. vol. 13, no. 5, pp. 2704-2716.
12. Антонов С.Н. Проектирование электроэнергетических систем : учебное пособие. Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет, 2014. 104 с.
13. Кузнецов С.М. Проектирование тяговых и трансформаторных подстанций : учебное пособие. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2013. 92 с.
14. Матаев У.М. Практикум по электроэнергетике (в примерах с решениями) : учебное пособие. Алматы: Нур-Принт, Казахский национальный аграрный университет, 2014. 195 с.
15. Мастепаненко М.А. Введение в специальность. Электроэнергетика и электротехника : учеб. пособие. Ставрополь : СтГАУ, 2015. 116 с.
16. Feng X., Tao Y., Wan M. Energy management and control strategy for multiport power supply system based on energy storage // 2017 Chinese Automation Congress (CAC). Jinan. 2017. pp. 5225-5230.
17. Ковалев И.Н. Электроэнергетические системы и сети : учебник. М. : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2015. 363 с.
18. Suslov K., Stashkevich E., Shushpanov I., Voropai N., Son P. T. Expansion planning of active power supply systems // 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe). Torino. 2017. pp. 1-5.
19. Грунтович Н.В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования : учеб. пособие. Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2017. 271 с.

20. Шеховцов В.П. Электрическое и электромеханическое оборудование : учебник, 3-е изд. М. : ИНФРА-М, 2018. 407 с.
21. Дьяков А.Ф. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике: учебник для вузов. Москва : Издательский дом МЭИ, 2016. 543 с.