

Аннотация

В работе решен комплекс вопросов по проектированию системы электроснабжения завода силовых агрегатов. В ходе проектирования был осуществлен расчет ожидаемых максимальных нагрузок по предприятию, выбор цеховых трансформаторов и трансформаторов на главной понизительной подстанции (ГПП), выбрана схема внутривозовского электроснабжения, рассчитаны значения токов короткого замыкания, выбрано основное электрооборудование, планируемое к установке на ГПП. Все выбранное электрооборудование было проверено на термическое и динамическое воздействие токов короткого замыкания. Произведен расчет заземления на ГПП.

Выпускная квалификационная работа бакалавра выполнена в объеме 56 страниц, включает 2 рисунка и 4 таблицы. Графическая часть работы состоит из 6 чертежей, выполненных на формате А1.

Содержание

Введение	4
1 Краткая характеристика объекта проектирования	5
2 Расчет ожидаемых расчетных нагрузок по цехам предприятия	6
3 Определение необходимого числа и номинальной мощности силовых трансформаторов цеховых КТП	10
4 Определение необходимого числа и номинальной мощности силовых трансформаторов главной понизительной подстанции	18
5 Выбор схемы внутризаводского электроснабжения	29
6 Расчет токов короткого замыкания	30
7 Выбор и проверка основного электрооборудования на главной понизительной подстанции	34
8 Расчет заземления ГПП	50
Заключение	53
Список используемых источников	54

Введение

В наши дни происходит постоянное развитие систем электроснабжения промышленных предприятий, усиливаются требования к надежности электроснабжения потребителей и повышению экономичности, широко внедряются автоматизированные системы учета и управления передачей и потребления энергоресурсов [1-3].

Выбор новых видов техники и используемых технологий в процессе проектирования электроснабжения требует учета уже накопленного опыта в зарубежных странах, определения возможностей отечественных производителей и строительных организаций. Стратегией развития ЕНЭС на период до 2020 г. намечен к внедрению ряд прогрессивных электросетевых технологий, таких как: гибкие системы передачи электрической энергии; УШР с микропроцессорными системами управления; использование эффектов сверхпроводимости; применение накопителей электроэнергии; внедрение автоматизированных подстанций с системой дистанционного управления высоковольтными выключателями; использование силовых трансформаторов с повышенной устойчивостью к токам коротких замыканий; внедрение оборудования с элегазовой изоляцией и др [4-6].

Основная масса электроприемников участвующих в технологическом процессе промышленного предприятия выпускается на напряжение до 1 кВ. Систему электроснабжения промышленного предприятия условно можно разделить на 3 подсистемы:

- внешнее электроснабжение промышленного предприятия;
- внутреннее электроснабжение предприятия;
- внутрицеховое электроснабжение [7].

Целью выпускной квалификационной работы является разработка системы электроснабжения завода силовых агрегатов, отвечающей требованиям надежности, безопасности и экономичности.

1 Краткая характеристика объекта проектирования

Завод силовых агрегатов располагается в городе Чебоксары. Завод производит заготовки трубопроводной арматуры, которые нашли применение на предприятиях нефтяной, газовой и энергетических отраслей. Продукция завода может изготавливаться как крупными партиями, так и в индивидуальном порядке. К продукции завода относятся фланцы различных типоразмеров, запорная арматура, фитинги и переходы. Продукция изготавливается методом горячей объемной штамповки либо различными способами литья из конструкционных и легированных сталей.

Тесное сотрудничество завода силовых агрегатов с изготовителями дизельных двигателей - Владимирским моторо-тракторным заводом и Алтайским моторным заводом позволяют осуществлять прямые поставки двигателей с заводов-изготовителей, а на мощностях самого завода в течение многих лет функционирует отлаженное производство запчастей и комплектующих, устанавливаемых на двигатели ЯМЗ и поставляемых на сборочные конвейеры ОАО «Автодизель».

Одним из основных видов деятельности завода силовых агрегатов является выпуск запасных частей и деталей к тракторам и комбайнам, которые выполняются по оригинальной конструкторской документации и в дальнейшем передаются на сборочные конвейеры заводов по выпуску тракторной техники. Высокий уровень технологии и качества производства, подтверждаются наличием сертификата ISO 9001.

Кроме того завод выпускает комплектующие для дробильно-сортировочного оборудования и карьерной техники: била; билодержатели, лопатки; молотки; футеровочные плиты; решетки; зубья ковша; катки; траки и пр.

2 Расчет ожидаемых расчетных нагрузок по цехам предприятия

Основой для рационального выбора элементов системы электроснабжения является достоверное нахождение расчетных электрических нагрузок, от которых зависят параметры всех элементов системы электроснабжения без исключения [8, 9].

Расчет нагрузок выполняется по методике, изложенной в [10].

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» [10, с. 10].

«Расчетная реактивная нагрузка группы электроприемников принимается:

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

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

где Q_C – средняя реактивная нагрузка» [10, 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_{II} – коэффициент использования; P_H – номинальная активная мощность этой группы, приведенная к ПВ = 100%; $\operatorname{tg} \varphi$ – коэффициент реактивной мощности рассматриваемой группы электроприемников» [10].

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	Цех	P_n , кВт	$P_{н.э.}$, кВт	n_3	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	РЛЦ	4852	194.08	25	0.67	0.81	0.72	3250.8	2353.57	0.71	2308.10	2353.57	3296.45
2	АЦ	6331	62.68	101	0.52	0.68	1.08	3292.1	3549.74	0.84	2765.38	3549.74	4499.78
3	РМЦ	363	13.96	26	0.46	0.82	0.70	166.98	116.55	0.72	120.23	116.55	167.45
4	ССЦ	22201	300.01	74	0.67	0.81	0.72	14875	10769.08	0.77	11453.50	10769.08	15721.18
5	ПЦ	934	30.13	31	0.26	0.69	1.05	242.84	254.74	0.81	196.70	254.74	321.84
6	ЭЦ	927	25.75	36	0.66	0.67	1.11	611.82	677.90	0.89	544.52	677.90	869.51
7	ЧЛЦ	10236	173.49	59	0.74	0.77	0.83	7574.6	6276.56	0.73	5529.49	6276.56	8364.83

Продолжение таблицы 2.1

№ цеха на плане предприятия	Цех	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	КЦ	19511	106.04	184	0.56	0.63	1.23	10926	13468.58	0.86	9396.50	13468.58	16422.44
Всего по предприятию		65355	14...300	536	0.63	-	0.92	40940	37466.71	-	32314.40	37466.71	49477.01

В таблице сокращенно обозначены следующие цеха: РЛЦ - ремонтно-литейный; АЦ - агрегатный; РМЦ - ремонтно-механический; ССЦ - сварочно-сборочный; ПЦ - прессовый; ЭЦ – электроцех; ЧЛЦ - чугунолитейный; КЦ - кузнечный.

3 Определение необходимого числа и номинальной мощности силовых трансформаторов цеховых КТП

3.1 Выбор трансформаторов КТП для электроснабжения ремонтно-литейного цеха

Найдем необходимую мощность силового трансформатора КТП по формуле [11, 12]:

$$S_{HT} > \frac{P_{p\Sigma}}{K_3 \cdot N_T}, \quad (3.1)$$
$$S_{HT} > \frac{2308.1}{0.8 \cdot 2} = 1443 \text{ кВА}.$$

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

3.1.1 Вариант с силовым трансформатором ТМГ -1600/10/0,4

По данным производителя силового трансформатора определяем его паспортные данные: $\Delta P_{xx} = 2.15 \text{ кВт}$, $\Delta P_{кз} = 16.8 \text{ кВт}$, $i_{xx} = 0.51\%$, $u_{кз} = 6\%$, $K_T = 728 \text{ тыс. руб}$.

Произведем расчет потерь в трансформаторе:

$$\Delta P_{mp} = N_T \cdot (P_{xx} + K_3^2 \cdot P_{кз}), \quad (3.2)$$
$$\Delta P_{mp} = 2 \cdot (2.15 + 0.8^2 \cdot 16.8) = 25.8 \text{ кВт},$$
$$\Delta Q_{mp} = N_T \cdot (i_0 + K_3^2 \cdot U_{кз}) \cdot \frac{S_H}{100}, \quad (3.3)$$
$$\Delta Q_{mp} = 2 \cdot (0.51 + 0.8^2 \cdot 6) \cdot \frac{1600}{100} = 139.2 \text{ квар}.$$

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

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

$$P_p = 2308.1 + 25.8 = 2333.9 \text{ кВт},$$

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

$$Q_p = 2353.6 + 139.2 = 2492.8 \text{ квар}.$$

Рассчитаем реактивную мощность в период минимальных нагрузок:

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

$$Q_{\min} = 0.5 \cdot 2492.8 = 1246.4 \text{ квар}.$$

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

$$Q'_{\text{э1}} = Q_p - 0,7 Q_{\text{сд}}, \quad (3.7)$$

$$Q'_{\text{э1}} = 2492.8 - 0.7 \cdot 0 = 2492.8 \text{ квар},$$

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

$$Q''_{\text{э1}} = 0.28 \cdot 2333.9 = 653.5 \text{ квар}.$$

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

Принимаем наименьшее значение $Q_{\text{э1}} = 653.5 \text{ квар}$.

Определим экономически целесообразные значения реактивной мощности в часы минимальных нагрузок:

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

$$Q_{\text{э2,в}} = 1246.4 - (2492.8 - 653.5) = -592.9 \text{ квар};$$

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

$$Q_{\varepsilon 2, H} = 1246.4 + 0 = 1246.4 \text{ квар};$$

где $Q_K = 0$.

Из-за повышенного уровня напряжения в период минимального потребления мощности принимаем наибольшее значение: $Q_{\varepsilon 2} = 1246.4 \text{ квар}$.

Определяем суммарное значение мощности конденсаторных установок:

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

$$Q_{\text{КУ max}} = 1,15 \cdot 2492.8 - 653.5 = 2213.2 \text{ квар}.$$

Из них мощность нерегулируемых КУ составит:

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

$$Q_{\text{КУ min}} = 1246.4 - 1246.4 = 0.$$

То есть все КУ должны регулироваться.

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

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

$$Q_{\varepsilon H} = 653.5 - (2492.8 - 2353.6) = 514.3 \text{ квар}.$$

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

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

$$Q_T = \sqrt{(2 \cdot 0.8 \cdot 1600)^2 - 2308.1^2} = 1107.4 \text{ квар},$$

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

$$Q_{KVH} = 2353.6 - 1107.4 = 1246.2 \text{ квар},$$

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

$$Q_{.KVB} = 2213.2 - 1246.2 = 967 \text{ квар}.$$

Принимаем к установке цеховую КТП с двумя силовыми трансформаторами ТМГ -1600/10/0,4, двумя конденсаторными установками 0,4 кВ типа АУКРМ 600 квар и двумя конденсаторными установками 10,5 кВ типа УКРП57 450 квар [13].

Определим продолжительность периода максимальных потерь

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

$$\tau = \left(0.124 + \frac{4690}{10000} \right)^2 \cdot 8760 = 3080 \text{ ч.}$$

Определим удельную стоимость потерь на холостом ходу в силовом трансформаторе:

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

$$C_{XX} = \left(\frac{615 \cdot 12}{4690} + 1.433 \right) \cdot 8760 = 26.339 \text{ тыс.руб/кВт}.$$

Определим удельную стоимость потерь короткого замыкания в силовом трансформаторе:

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

$$C_{K3} = \left(\frac{615 \cdot 12}{4690} + 1.433 \right) \cdot 3080 = 9.261 \text{ тыс.руб/кВт} .$$

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

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

$$C \cdot \Delta P_T = 26.339 \cdot 2.15 + 9.261 \cdot 0.8^2 \cdot 16.8 = 156.199 \text{ тыс.руб.}$$

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

$$Z_{КТП} = E \cdot (K_T \cdot N_T + K_{KV6} \cdot N_{KV6} + K_{KVH} \cdot N_{KVH}) + C \cdot \Delta P \cdot N_T , \quad (3.21)$$

$$Z_{КТП} = 0.223 \cdot (728 \cdot 2 + 216 \cdot 2 + 187.6 \cdot 2) + (156.199 \cdot 2) = 817.091 \text{ тыс.руб.}$$

3.1.2 Вариант с силовым трансформатором ТМГ -2000/10/0,4

По данным производителя силового трансформатора определяем его паспортные данные: $\Delta P_{XX} = 2.6 \text{ кВт}$, $\Delta P_{K3} = 23.3 \text{ кВт}$, $i_{XX} = 0.51 \%$, $u_{K3} = 6 \%$, $K_T = 918 \text{ тыс. руб.}$

Произведем расчет потерь в трансформаторе:

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

$$\Delta P_{mp} = 2 \cdot (2.6 + 0.8^2 \cdot 23.3) = 35.02 \text{ кВт},$$

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

$$\Delta Q_{mp} = 2 \cdot (0.51 + 0.8^2 \cdot 6) \cdot \frac{2000}{100} = 174 \text{ квар.}$$

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

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

$$P_p = 2308.1 + 35.02 = 2343.1 \text{ кВт},$$

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

$$Q_p = 2353.6 + 174 = 2527.6 \text{ квар}.$$

Рассчитаем реактивную мощность в период минимальных нагрузок:

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

$$Q_{\min} = 0.5 \cdot 2527.6 = 1263.8 \text{ квар}.$$

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

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

$$Q'_{\text{э1}} = 2527.6 - 0.7 \cdot 0 = 2527.6 \text{ квар},$$

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

$$Q''_{\text{э1}} = 0.28 \cdot 2343.1 = 656.1 \text{ квар}.$$

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

Принимаем наименьшее значение $Q_{\text{э1}} = 656.1 \text{ квар}$.

Определим экономически целесообразные значения реактивной мощности в часы минимальных нагрузок:

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

$$Q_{\text{э2,в}} = 1263.8 - (2527.6 - 656.1) = -607.7 \text{ квар};$$

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

$$Q_{\varepsilon 2, H} = 1263.8 + 0 = 1263.8 \text{ квар};$$

где $Q_{\kappa} = 0$.

Из-за повышенного уровня напряжения в период минимального потребления мощности принимаем наибольшее значение: $Q_{\varepsilon 2} = 1263.8 \text{ квар}$.

Определяем суммарное значение мощности конденсаторных установок:

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

$$Q_{\text{ку max}} = 1,15 \cdot 2527.6 - 656.1 = 2250.6 \text{ квар}.$$

Из них мощность нерегулируемых КУ составит:

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

$$Q_{\text{ку min}} = 1263.8 - 1263.8 = 0.$$

То есть все КУ должны регулироваться.

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

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

$$Q_{\varepsilon H} = 656.1 - (2527.6 - 2353.6) = 482.1 \text{ квар}.$$

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

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

$$Q_T = \sqrt{(2 \cdot 0.8 \cdot 2000)^2 - 2308.1^2} = 2216.5 \text{ квар},$$

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

$$Q_{KVH} = 2353.6 - 2216.5 = -137.1 \text{ квар},$$

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

$$Q_{.KVB} = 2250.6 - 137.1 = 2113.5 \text{ квар}.$$

Принимаем к установке цеховую КТП с двумя силовыми трансформаторами ТМГ -2000/10/0,4, двумя конденсаторными установками 0,4 кВ типа АУКРМ 75 квар и двумя конденсаторными установками 10,5 кВ типа УКРП57 900 квар.

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

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

$$C \cdot \Delta P_T = 26.339 \cdot 2.6 + 9.261 \cdot 0.8^2 \cdot 23.3 = 206.575 \text{ тыс.руб.}$$

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

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

$$Z_{КТП} = 0.223 \cdot (918 \cdot 2 + 38.2 \cdot 2 + 218 \cdot 2) + (206.575 \cdot 2) = 936.843 \text{ тыс.руб.}$$

По минимуму приведенных затрат на основное оборудование КТП принимаем к установке 2х трансформаторную подстанцию с силовыми трансформаторами ТМГ -1600/10/0,4.

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

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

$$U_{РАЦ} = 4.34 \cdot \sqrt{L + 0.016 \cdot P_{PI}}, \quad (4.1)$$
$$U_{РАЦ} = 4.34 \cdot \sqrt{11 + 0.016 \cdot 32314} = 100 \text{ кВ},$$

где расчетная активная нагрузка предприятия определяется:

$$P_{PI} = P_{PH} + P_{PB} + P_{STOP}, \quad (4.2)$$
$$P_{PI} = 32314.4 + 0 + 0 = 32314 \text{ кВт.}$$

Полную расчетную нагрузку предприятия определим по формуле:

$$S_{PI} = \sqrt{P_{PI}^2 + Q_{ЭС}^2}, \quad (4.3)$$
$$S_{PI} = \sqrt{32314^2 + 8079^2} = 33309 \text{ кВА},$$

где величину расчетной реактивной нагрузки предприятия найдем по формуле:

$$Q_{ЭС} = P_{PI} \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (4.4)$$
$$Q_{ЭСi} = 32314 \cdot 0.25 = 8079 \text{ квар.}$$

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.

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

$$S_{номт} \approx 0,8 \cdot 33309 \cdot \frac{1}{1,4} = 19034 \text{ кВА.}$$

По шкале номинальных мощностей и каталогу производителя силовых трансформаторов выбираем для дальнейшего рассмотрения два варианта: трансформаторы ТРДН-25000/110/10/10 и следующий по шкале номинальных мощностей ТРДН-40000/110/10/10.

4.1 Вариант установки на ГПП предприятия двух силовых трансформаторов ТРДН -25000/110/10/10

По сайту производителя силового трансформатора определяем его паспортные данные: $\Delta P_{XX} = 27 \text{ кВт}$, $\Delta P_{КЗ} = 123 \text{ кВт}$, $i_{XX} = 0.61 \%$, $u_{КЗ} = 10.5 \%$, $K_T = 30000 \text{ тыс. руб.}$

Найдем значение приведенных потерь активной мощности в силовом трансформаторе на холостом ходу по формуле [15, 16]:

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

$$\Delta P_x' = 27 + 0.05 \cdot 152.5 = 34.63 \text{ кВт},$$

где

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

$$\Delta Q_x = 0.61 \cdot 25000 / 100 = 152.5 \text{ квар},$$

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

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

- для обмотки напряжением 110 кВ по формулам:

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

$$\Delta Q_{к.в} = 1.3 \cdot 25000 / 100 = 328.1 \text{ квар},$$

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

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

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

$$\Delta P'_{к.в} = 0 + 0.05 \cdot 328.1 = 16.4 \text{ кВт}.$$

$$\Delta P_{к.в} = 0.$$

- для обмотки напряжением 10 кВ по формулам:

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

$$\Delta Q_{к.н1} = \Delta Q_{к.н2} = 18.375 \cdot 25000 / 100 = 4593.8 \text{ квар},$$

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

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

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

$$\Delta P'_{к.н1} = \Delta P'_{к.н2} = 246 + 0.05 \cdot 4593.8 = 475.7 \text{ кВт},$$

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

$$\Delta P_{к.н1,2} = 2 \cdot 123 = 246 \text{ кВт}.$$

Значение коэффициентов загрузки каждой из обмоток трансформатора найдем по формуле:

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

$$K_{3.6} = \frac{33309}{25000} = 1.33.$$

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

$$K_{3.н1} = K_{3.н2} = \frac{16654.5}{25000} = 0.67.$$

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

$$P_m^{\dot{}} = \Delta P_x^{\dot{}} + K_{3.6}^2 \cdot \Delta P_{к.6}^{\dot{}} + K_{3.н1}^2 \cdot \Delta P_{к.н1}^{\dot{}} + K_{3.н2}^2 \cdot \Delta P_{к.н2}^{\dot{}} \quad (4.17)$$

$$P_m^{\dot{}} = 34.63 + 1.33^2 \cdot 16.4 + 0.67^2 \cdot 475.7 + 0.67^2 \cdot 475.7 = 486 \text{ кВт}.$$

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

$$\Delta W_{nc} = \sum \Delta W_{xi} + \sum \Delta W_{ki} = \sum n_i \cdot \Delta P_x' \cdot T_i + \sum \left(\frac{1}{n_i} \cdot K_{3.6i}^2 \cdot \Delta P_{к.6}' \cdot T_i + \frac{1}{n_i} \cdot K_{3.н1i}^2 \cdot \Delta P_{к.н1}' \cdot T_i + \frac{1}{n_i} \cdot K_{3.н2i}^2 \cdot \Delta P_{к.н2}' \cdot T_i \right) \quad (4.18)$$

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

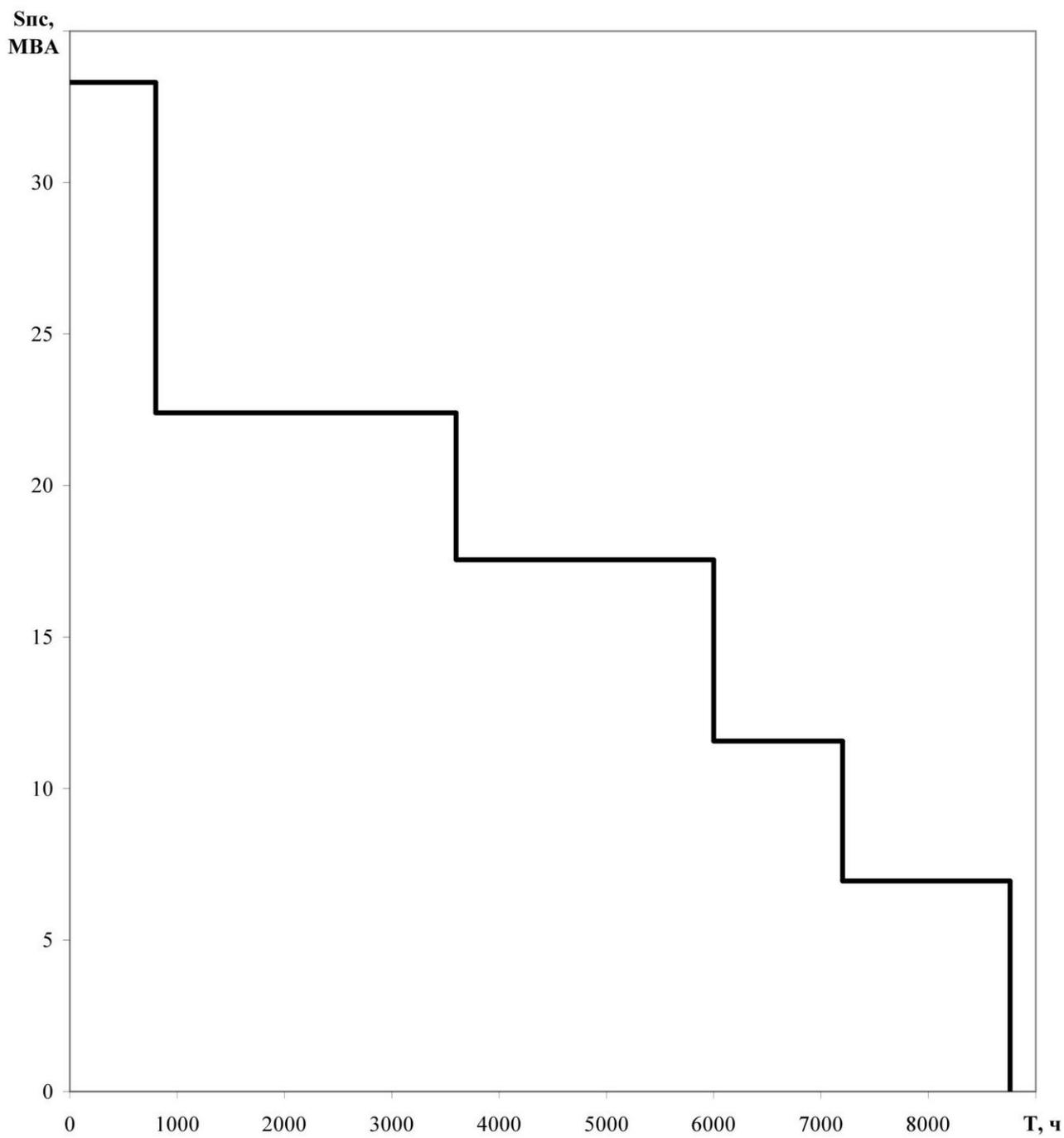


Рисунок 4.1 – Суммарный годовой график нагрузки подстанции предприятия

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	$T_i, \text{ч}$	$\Delta W_{xi},$ $\kappa Bm \cdot \text{ч}$	$K_{зBi}$	$K_{зH1i}$	$K_{зH2i}$	$\Delta W_{\kappa Bi},$ $\kappa Bm \cdot \text{ч}$	$\Delta W_{\kappa H1i},$ $\kappa Bm \cdot \text{ч}$	$\Delta W_{\kappa H2i},$ $\kappa Bm \cdot \text{ч}$
1	33.309	16.655	16.655	2	800	55400	1.332	0.666	0.666	11650	84443	84443
2	22.397	11.199	11.199	2	2800	193900	0.896	0.448	0.448	18435	133629	133629
3	17.554	8.777	8.777	2	2400	166200	0.702	0.351	0.351	9707	70361	70361
4	11.563	5.782	5.782	2	1200	83100	0.463	0.231	0.231	2106	15265	15265
5	6.948	3.474	3.474	2	1560	108030	0.278	0.139	0.139	988	7164	7164
$\Sigma \Delta W_{xi} = 606630$										$\Sigma \Delta W_{\kappa Bi} = 664611$		

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

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

$$I_{\Delta W_{ПТС}} = (664611 + 606630) \cdot 3.007 = 3823 \text{ тыс. руб.}$$

где $C_{\text{э}} = 3.007 \text{ руб} / \text{кВт} \cdot \text{ч}$ - стоимость 1 кВт·ч потерь электрической энергии.

Определим значение суммарных приведенных затрат на ГПП по формуле:

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

$$Z_{\text{прив}} = 0.25 \cdot 60000 + 5640 + 3823 = 24462 \text{ тыс. руб.}$$

где $K = 2 \cdot 30000 = 60000 \text{ тыс. руб.}$ - цена за два силовых трансформатора ТРДН-25000/110/10/10;

$$I_{\text{э}} = P_{\text{сум}} \cdot K = 0,094 \cdot 60000 = 5640 \text{ тыс. руб.}$$
 - годовые отчисления.

4.2 Вариант установки на ГПП предприятия двух силовых трансформаторов ТРДН -40000/110/10/10

По сайту производителя силового трансформатора определяем его паспортные данные: $\Delta P_{XX} = 36 \text{ кВт}$, $\Delta P_{K3} = 173 \text{ кВт}$, $i_{XX} = 0.51 \%$, $u_{K3} = 10.5 \%$, $K_T = 40304 \text{ тыс. руб.}$

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

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

$$\Delta P'_x = 36 + 0.05 \cdot 204 = 46.2 \text{ кВт},$$

где

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

$$\Delta Q_x = 0.51 \cdot 40000 / 100 = 204 \text{ квар},$$

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

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

- для обмотки напряжением 110 кВ по формулам:

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

$$\Delta Q_{\text{к.в}} = 1.3 \cdot 40000 / 100 = 525 \text{ квар},$$

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

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

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

$$\Delta P'_{\text{к.в}} = 0 + 0.05 \cdot 525 = 26.3 \text{ кВт}.$$

$$\Delta P_{\text{к.в}} = 0.$$

- для обмотки напряжением 10 кВ по формулам:

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

$$\Delta Q_{\text{к.н1}} = \Delta Q_{\text{к.н2}} = 18.375 \cdot 40000 / 100 = 7350 \text{ квар},$$

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

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

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

$$\Delta P'_{\text{к.н1}} = \Delta P'_{\text{к.н2}} = 346 + 0.05 \cdot 7350 = 713.5 \text{ кВт},$$

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

$$\Delta P_{к.н1,2} = 2 \cdot 173 = 346 \text{ кВт.}$$

Значение коэффициентов загрузки каждой из обмоток трансформатора найдем по формуле:

$$K_{3.б} = \frac{S_B}{S_{ном,Т}}, \quad (4.30)$$

$$K_{3.б} = \frac{33309}{40000} = 0.83.$$

$$K_{3.н1} = K_{3.н2} = \frac{S_{H1,2}}{S_{ном,Т}}, \quad (4.31)$$

$$K_{3.н1} = K_{3.н2} = \frac{16654.5}{40000} = 0.42.$$

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

$$P_m^{\dot{}} = \Delta P_x^{\dot{}} + K_{3.б}^2 \cdot \Delta P_{к.б}^{\dot{}} + K_{3.н1}^2 \cdot \Delta P_{к.н1}^{\dot{}} + K_{3.н2}^2 \cdot \Delta P_{к.н2}^{\dot{}}, \quad (4.32)$$

$$P_m^{\dot{}} = 46.2 + 0.83^2 \cdot 26.3 + 0.42^2 \cdot 713.5 + 0.42^2 \cdot 713.5 = 311.8 \text{ кВт.}$$

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

$$\Delta W_{nc} = \sum \Delta W_{xi} + \sum \Delta W_{ki} = \sum n_i \cdot \Delta P_x' \cdot T_i + \sum \left(\frac{1}{n_i} \cdot K_{3.бi}^2 \cdot \Delta P_{к.б}' \cdot T_i + \frac{1}{n_i} \cdot K_{3.н1i}^2 \cdot \Delta P_{к.н1}' \cdot T_i + \frac{1}{n_i} \cdot K_{3.н2i}^2 \cdot \Delta P_{к.н2}' \cdot T_i \right) \quad (4.33)$$

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:

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

$$I_{\Delta W_{ПТС}} = (391080 + 809424) \cdot 3.007 = 3610 \text{ тыс. руб.}$$

где $C_{\text{э}} = 3.007 \text{ руб} / \text{кВт} \cdot \text{ч}$ - стоимость 1 кВт·ч потерь электрической энергии.

Определим значение суммарных приведенных затрат на ГПП по формуле:

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

$$Z_{\text{прив}} = 0.25 \cdot 80608.78 + 7577 + 3610 = 31339 \text{ тыс.руб.}$$

где $K = 2 \cdot 40304.39 = 80608.78 \text{ тыс.руб.}$ – цена за два силовых трансформатора ТРДН-40000/110/10/10;

$$I_{\text{э}} = P_{\text{сум}} \cdot K = 0,094 \cdot 80608.78 = 7577 \text{ тыс.руб.} \text{ – годовые отчисления.}$$

По минимальным приведенным затратам выбираем к установке на ГПП вариант с установкой двух силовых трансформаторов ТРДН- 25000/110/10/10 с суммарными приведенными затратами 24462 тыс.руб.

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 , 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	33.309	16.655	16.655	2	800	73920	0.833	0.416	0.416	7281	49476	49476
2	22.397	11.199	11.199	2	2800	258720	0.560	0.280	0.280	11522	78295	78295
3	17.554	8.777	8.777	2	2400	221760	0.439	0.219	0.219	6067	41225	41225
4	11.563	5.782	5.782	2	1200	110880	0.289	0.145	0.145	1316	8944	8944
5	6.948	3.474	3.474	2	1560	144144	0.174	0.087	0.087	618	4197	4197
$\Sigma \Delta W_{xi} = 809424$										$\Sigma \Delta W_{кBi} = 391080$		

5 Выбор схемы внутриводского электроснабжения

Распределение электроэнергии может осуществляться по радиальной, магистральной или смешанной схемам.

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

Магистральные схемы применяются в распределительных сетях 6-10 кВ тогда, когда потребителей электроэнергии достаточно много и радиальные схемы становятся нецелесообразными из-за наличия множества звеньев коммутации. 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.

Комплексное использование радиальных и магистральных схем дает возможность выполнить схему распределительной сети с получением наилучших технико-экономических параметров [14, 17-19].

6 Расчет токов короткого замыкания

Для расчета значений токов короткого замыкания составляем две схемы: расчетную схему и схему замещения, изображенные на рисунке 6.1.

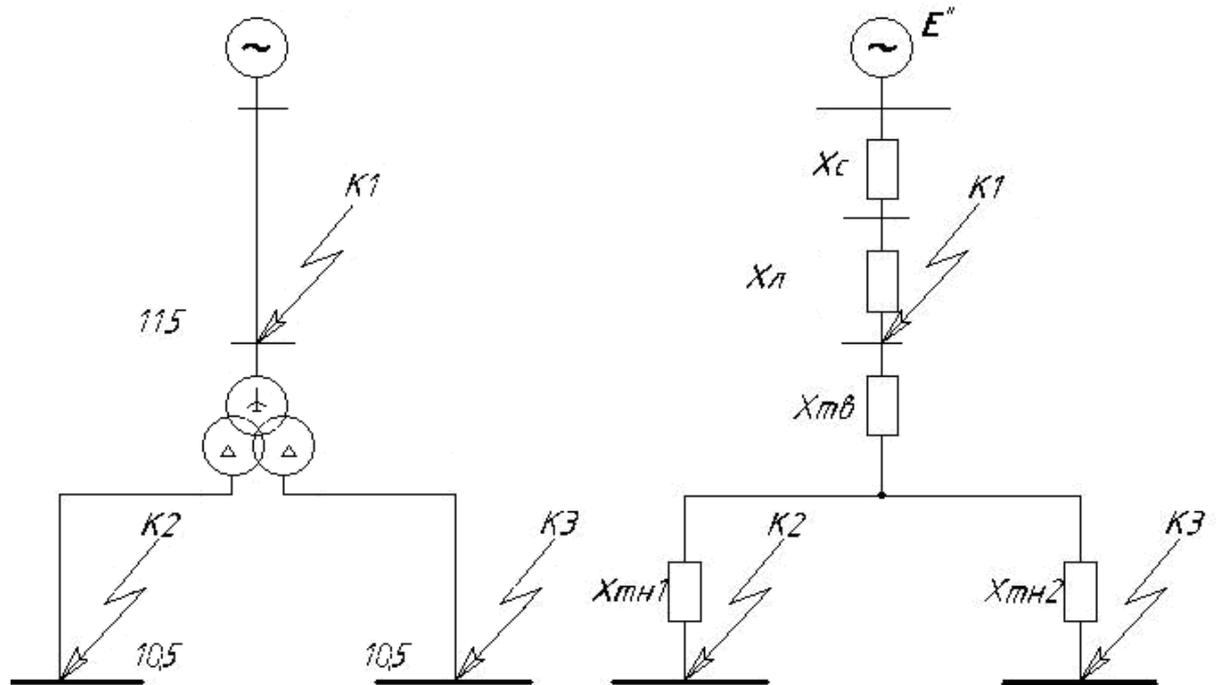


Рисунок 6.1 - Расчётная схема и схема замещения для определения значений токов КЗ

Параметры, необходимые для определения значений токов КЗ:

Параметры внешней ЭЭС: $U_{cp} = 115$ кВ; $S_{\sigma} = 1000$ МВА; $S_{\kappa} = 3600$ МВА.

Параметры питающей кабельной линии электропередачи:
 $x_{yd} = 0,4$ Ом/км; $L = 11$ км.

Параметры выбранного к установке на ГПП силового трансформатора:
 $S_{н} = 25$ МВА; $U_{\kappa} = 10.5$ %.

Определим сопротивление системы по формуле [20]:

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

$$x_{c.\bar{b}} = \frac{1000}{3600} = 0.278.$$

Определим сопротивление воздушной линии электропередачи по формуле:

$$x_{ВЛ.\bar{b}} = \frac{x_{уд}}{2} \cdot L \cdot \frac{S_{\bar{b}}}{U_{сн}^2}; \quad (6.2)$$

$$x_{ВЛ.\bar{b}} = \frac{0.4}{2} \cdot 11 \cdot \frac{1000}{115^2} = 0.166.$$

Определим сопротивление принятого к установке на ГПП силового трансформатора ТРДН-25000/110/10/10 по формуле:

$$x_{Т.В.\bar{b}} = \frac{U_{к.в}, \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{b}}}{S_{н}}; \quad (6.3)$$

$$x_{Т.В.\bar{b}} = \frac{1.3125}{100} \cdot \frac{1000}{25} = 0.525.$$

$$x_{Т.Н.\bar{b}} = \frac{U_{к.н}, \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{b}}}{S_{н}}; \quad (6.4)$$

$$x_{Т.Н.\bar{b}} = \frac{18.375}{100} \cdot \frac{1000}{25} = 7.35.$$

6.1 Расчет для точки К1

Определим суммарное сопротивление цепи:

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

$$x_{рез1} = 0.278 + 0.166 = 0.444.$$

Найдем значение базисного тока:

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

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

Определим начальное действующее значение трехфазного тока короткого замыкания по формуле:

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

$$I_{к1}^{(3)} = \frac{1}{0.444} \cdot 5.02 = 11.304 \text{ кА.}$$

Определим значение ударного тока КЗ:

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

$$i_{уд.к1} = \sqrt{2} \cdot 11.304 \cdot 1.8 = 28.775 \text{ кА.}$$

6.2 Расчет для точки К2

Определим суммарное сопротивление цепи:

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

$$x_{рез2} = 0.444 + 0.525 + 7.35 = 8.319.$$

Найдем значение базисного тока:

$$I_{\sigma.k2} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{сн}}; \quad (6.10)$$

$$I_{\sigma.k2} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10.5} = 54.986 \text{ кА.}$$

Определим начальное действующее значение трехфазного тока короткого замыкания по формуле:

$$I_{к2}^{(3)} = \frac{E_{\sigma}}{x_{рез2}} \cdot I_{\sigma.k2}; \quad (6.11)$$

$$I_{к2}^{(3)} = \frac{1}{8.319} \cdot 54.986 = 6.610 \text{ кА.}$$

Определим значение ударного тока КЗ:

$$i_{уд.k2} = \sqrt{2} \cdot I_{н,о}^{(3)} \cdot \kappa_{уд}; \quad (6.12)$$

$$i_{уд.k2} = \sqrt{2} \cdot 6.610 \cdot 1.85 = 17.293 \text{ кА.}$$

Результаты определения значений токов короткого замыкания заносим в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты определения значений токов короткого замыкания

№ точки КЗ	$U_{сн}$, кВ	$\kappa_{уд}$	$I_{к}^{(3)}$, кА	$i_{уд}$, кА
1	115	1.8	11.3	28.8
2	10.5	1.85	6.6	17.3

7 Выбор и проверка основного электрооборудования на главной понизительной подстанции

7.1 Выбор электрических аппаратов на стороне 110 кВ

7.1.1 Выбор высоковольтного выключателя

На стороне высокого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем высоковольтный выключатель (ВВ) типа ВЭБ-УЭТМ-110 УХЛ1.

ВВ выбираем и проверяем по следующим условиям:

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

- значению номинального тока:

$$I_{max} < I_n, \quad (7.2)$$
$$176 \text{ А} < 2500 \text{ А},$$

где

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

- коммутационной способности:

$$I_{к1}^{(3)} \leq I_{откл.н}, \quad (7.4)$$
$$11.3 \text{ кА} \leq 40 \text{ кА},$$

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

$$6.2 \text{ кА} \leq 23.2 \text{ кА},$$

где

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{\kappa 1}^{(3)} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}}, \quad (7.6)$$

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot 11.3 \cdot e^{\frac{-0.047}{0.05}} = 6.2 \text{ кА},$$

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

$$i_{a.n.} = \left(\sqrt{2} \cdot \frac{41}{100} \right) \cdot 40 = 23.2 \text{ кА},$$

- электродинамической стойкости:

$$I_{\kappa 1}^{(3)} \leq I_{np.c}, \quad (7.8)$$

$$11.3 \text{ кА} \leq 40 \text{ кА};$$

$$i_{y\delta} \leq i_{np.c}, \quad (7.9)$$

$$28.8 \text{ кА} \leq 85 \text{ кА};$$

- термической стойкости:

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

$$18.8 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 155.2 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Принятый к установке на стороне высокого напряжения на ГПП высоковольтный выключатель типа ВЭБ-УЭТМ-110 УХЛ1 прошел необходимые проверки.

7.1.2 Выбор разъединителя

На стороне высокого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем разъединитель типа РПД-110 УХЛ1.

Разъединитель выбираем и проверяем по следующим условиям:

- уровню номинального напряжения [21]:

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

- значению номинального тока:

$$I_{max} < I_n, \quad (7.12)$$
$$176 \text{ А} < 1250 \text{ А},$$

- электродинамической стойкости:

$$i_{уд} \leq i_{нр.с}, \quad (7.13)$$
$$28.8 \text{ кА} \leq 70 \text{ кА};$$

- термической стойкости:

$$B_k \leq I_{нр.с}^2 \cdot t_{нр.с}, \quad (7.14)$$
$$18.8 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 60.6 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

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

7.1.3 Выбор трансформатора тока

На стороне высокого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем трансформатор тока типа ТВТ-110-І-300/5.

Трансформатор тока выбирается и проверяется по:

- уровню номинального напряжения:

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

- значению номинального тока:

$$I_{\max} \leq I_{Н.ТТ}, \quad (7.16)$$
$$176 \text{ А} \leq 300 \text{ А};$$

- электродинамической стойкости:

$$i_{уд} \leq i_{э\text{лдин.ст}}, \quad (7.17)$$
$$28.8 \text{ кА} \leq 40 \text{ кА};$$

- термической стойкости:

$$B_k \leq K_T^2 \cdot I_{1\text{ном.}}^2 \cdot t_{откл} = I_T^2 \cdot t_{откл}, \quad (7.18)$$
$$18.8 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 60.6 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

- величине вторичной нагрузки:

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

где $Z_2 \approx R_2$

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

К вторичной нагрузке трансформатора тока относится амперметр мощностью 0.2 ВА. Определим активное сопротивление прибора:

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

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

Значение максимально допустимого сопротивления проводов составит:

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

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

Определим минимально допустимое сечение медного провода:

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

$$s = \frac{0.0175 \cdot 65}{1.092} = 1.042 \text{ мм}^2.$$

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

Принятый к установке на стороне высокого напряжения на ГПП трансформатор тока типа ТВТ-110-І-300/5 прошел необходимые проверки.

7.1.4 Выбор гибких шин

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

Определим необходимое сечение провода:

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

$$s = \frac{126}{1.1} = 114 \text{ мм}^2.$$

Принимаем провода АС-120/19 мм² с максимальным значением продолжительного тока 395 А.

Найдем максимальное значение критической напряженности электрического поля:

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

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

Определим значение напряженности вблизи проводника:

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

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

Проверим на отсутствие короны:

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

$$21.3 \text{ кВ/м} < 30.0 \text{ кВ/м.}$$

Принятый к установке на стороне высокого напряжения на ГПП в качестве гибких шин провод типа АС-120/19 прошел необходимые проверки.

7.1.5 Выбор ограничителей перенапряжений

К установке на стороне высокого напряжения подстанции принимаем ОПН-110 УХЛ1.

7.1.6 Выбор заземлителей

В нейтрали силовых трансформаторов принимаем к установке ЗОН-110М-1 УХЛ1.

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 ВВМ-СЭЦ-10-20/1000.

ВВ выбираем и проверяем по следующим условиям:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (7.27)$$

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- значению номинального тока:

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

$$962 \text{ А} < 1000 \text{ А},$$

где

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

$$I_{\max} = 1.4 \cdot \frac{25000}{\sqrt{3} \cdot 10.5 \cdot 2} = 962 \text{ А};$$

- коммутационной способности:

$$I_{\kappa 1}^{(3)} \leq I_{откл.н}, \quad (7.30)$$

$$6.6 \text{ кА} \leq 25 \text{ кА},$$

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

$$4.5 \text{ кА} \leq 15.2 \text{ кА},$$

где

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{\kappa 1}^{(3)} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}}, \quad (7.32)$$

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot 6.6 \cdot e^{\frac{-0.042}{0.058}} = 4.5 \text{ кА},$$

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

$$i_{a.н.} = \left(\sqrt{2} \cdot \frac{43}{100} \right) \cdot 25 = 15.2 \text{ кА},$$

- электродинамической стойкости:

$$I_{\kappa 1}^{(3)} \leq I_{нр.с}, \quad (7.34)$$

$$6.6 \text{ кА} \leq 25 \text{ кА};$$

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

$$17.3 \text{ кА} \leq 55 \text{ кА};$$

- термической стойкости:

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

$$6.5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 57.5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Принятый к установке на стороне низкого напряжения на ГПП высоковольтный выключатель типа ВВМ-СЭЩ-10-20/1000 прошел необходимые проверки.

7.2.2 Выбор трансформатора тока

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

Трансформатор тока выбирается и проверяется по:

- уровню номинального напряжения:

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

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- значению номинального тока:

$$I_{\text{max}} \leq I_{\text{н.т.т}}, \quad (7.38)$$

$$962 \text{ А} \leq 1000 \text{ А};$$

- электродинамической стойкости:

$$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{электр.ст}}, \quad (7.39)$$

$$17.3 \text{ кА} \leq 85 \text{ кА};$$

- термической стойкости:

$$B_k \leq K_T^2 \cdot I_{1ном.}^2 \cdot t_{откл} = I_T^2 \cdot t_{откл},, \quad (7.40)$$

$$6.5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 162.3 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

- величине вторичной нагрузки:

$$Z_2 \leq Z_{2ном}, \quad (7.41)$$

где $Z_2 \approx R_2$

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

К вторичной нагрузке трансформатора тока на стороне низкого напряжения ГПП относятся амперметр, ваттметр, варметр, счетчик активной и реактивной энергии общей мощностью 6.8 ВА. Определим активное сопротивление приборов:

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

$$R_{приб} = \frac{6.8}{5^2} = 0.272 \text{ Ом}.$$

Значение максимально допустимого сопротивления проводов составит:

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

$$R_{пр} = 1.2 - 0.272 - 0.1 = 0.828 \text{ Ом}.$$

Определим минимально допустимое сечение медного провода:

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

$$s = \frac{0.0175 \cdot 43}{0.828} = 0.909 \text{ мм}^2.$$

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

Принятый к установке на стороне низкого напряжения на ГПП трансформатор тока типа ТОЛ-СЭЦ-10-1000/5 прошел необходимые проверки.

По такому же принципу выбираем трансформаторы тока для отходящих линий.

7.2.3 Выбор трансформатора напряжения

На стороне низкого напряжения главной понизительной подстанции устанавливаем трансформатор напряжения типа ЗНОЛ-СЭЦ-1.

Трансформатор напряжения выбирается и проверяется по:

- уровню номинального напряжения:

$$U_{сети} \leq U_n, \quad (7.45)$$

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- по классу точности;

- по величине вторичной нагрузки:

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

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

К вторичной нагрузке трансформатора напряжения относятся счетчики активной и реактивной электрической энергии с общей полной мощностью 23 ВА.

$$23 \text{ ВА} \leq 50 \text{ ВА}.$$

Принятый к установке на стороне низкого напряжения на ГПП трансформатор напряжения типа ЗНОЛ-СЭЩ-1 прошел необходимые проверки.

7.2.4 Выбор жестких шин

Выбор жестких шин осуществляем по экономической плотности тока:

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

$$s = \frac{687}{1.1} = 625 \text{ мм}^2.$$

Выбираем алюминиевые шины прямоугольного сечения с размерами 60x10 мм, с максимальным продолжительным током 1155 А.

Определим минимальное сечение шины по условию термической стойкости:

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

$$s_{\min} = \frac{\sqrt{6.5} \cdot 10^3}{66} = 38.6 \text{ мм}^2.$$

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

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

$$F_{\max}^{(3)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{1} \cdot 2 \cdot 17300^2 \cdot 1 \cdot 1 = 103.7 \text{ Н.}$$

Определим значение момента сопротивления поперечного сечения шины по формуле:

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

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

Найдем значение максимального напряжения в материале проводника:

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

$$\sigma_{\max} = \frac{103.7 \cdot 2}{8 \cdot 6 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-6} = 4.3 \text{ МПа.}$$

Проверим на электродинамическую стойкость:

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

$$4.3 \text{ МПа} \leq 247.1 \text{ МПа,}$$

где

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

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

Найдем значение момента инерции поперечного сечения проводника по

формуле:

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

$$J = \frac{0.01 \cdot 0.06^3}{12} = 1.8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4.$$

Найдем значение частоты собственных колебаний по формуле:

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

$$f_0 = \frac{3.14^2}{2 \cdot \pi \cdot 2^2} \cdot \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 1.8 \cdot 10^{-7}}{2.5}} = 27.9 \text{ Гц}.$$

При частоте собственных колебаний менее 30 Гц отсутствует механический резонанс.

7.2.5 Выбор опорных изоляторов

Опорные изоляторы используются для установки шин. Устанавливаем изоляторы типа ИОР-10-3.75 УХЛ2.

Опорные изоляторы выбираются и проверяются по:

- уровню номинального напряжения:

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

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- по максимально допустимой нагрузке на головку изолятора:

$$F_{\text{max}}^{(3)} \leq F_{\text{дон}}, \quad (7.58)$$

$$103.7 \text{ Н} < 1607 \text{ Н},$$

где

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

$$F_{\text{дон}} = 0.6 \cdot 3750 \cdot \frac{0.12}{0.14} = 1688 \text{ Н.}$$

где

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

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

Принятые к установке на стороне низкого напряжения на ГПП опорные изоляторы ИОР-10-3.75 УХЛ2 прошли необходимые проверки.

7.2.6 Выбор проходных изоляторов

Выбираем проходные изоляторы типа ИП-10/1000-7.5 УХЛ2.

Проходные выбираются и проверяются по:

- уровню номинального напряжения:

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

$$10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ};$$

- номинальному току:

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

$$962 \text{ А} < 1000 \text{ А};$$

- значению максимальной нагрузки на головку изолятора:

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

$$29.9 \text{ Н} < 4500 \text{ Н},$$

где

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

$$F_{расч} = 0.5 \cdot \frac{17300^2}{1} \cdot 2 \cdot 10^{-7} = 29.9.$$

Принятые к установке на ГПП проходные изоляторы типа ИП-10/1000-7.5 УХЛ2 прошли необходимые проверки.

7.2.7 Выбор ограничителей перенапряжения

К установке на стороне низкого напряжения подстанции принимаем ОПН-ЭС-10/12.7 УХЛ 2.

8 Расчет заземления ГПП

Одной из основных характеристик, обеспечивающих электробезопасность, является значение предельно допустимого напряжения прикосновения, которое должно обеспечиваться во всех режимах функционирования объекта [22].

При времени отключения тока короткого замыкания 0.047 с максимально допустимое напряжение прикосновения равно 500 В.

Определим значение напряжения на заземлителе по формуле:

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

$$U_3 = \frac{500}{0.221} = 2261 \text{ В},$$

где коэффициент напряжения прикосновения определяется как:

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

$$\kappa_{II} = \frac{0.5 \cdot 0.93}{\left(\frac{7 \cdot 634}{14 \cdot \sqrt{3688}}\right)^{0.45}} = 0.221,$$

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

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

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

Вычисленное напряжение на заземлителе лежит в допустимых пределах (10 кВ). Сопротивление заземляющего устройства должно удовлетворять условию:

$$R_3 < R_{3,доп}. \quad (8.4)$$

Определим число ячеек для расчетной модели заземлителя по формуле:

$$m = \frac{L_2}{2 \cdot \sqrt{S}} - 1, \quad (8.5)$$
$$m = \frac{634}{2 \cdot \sqrt{3688}} - 1 \approx 4.$$

Определим значение длины полос в расчетной модели по формуле:

$$L_2' = 2\sqrt{S}(m+1), \quad (8.6)$$
$$L_2' = 2\sqrt{3688} \cdot (4+1) = 607.3 \text{ м.}$$

Определим длину сторон ячейки по формуле:

$$b = \frac{\sqrt{S}}{m}, \quad (8.7)$$
$$b = \frac{\sqrt{3688}}{4} = 15.2 \text{ м.}$$

Определим число вертикальных заземлителей, которые необходимо установить по контуру:

$$n_g = \frac{\sqrt{S} \cdot 4}{1 \cdot l_g}, \quad (8.8)$$

$$n_g = \frac{\sqrt{3688} \cdot 4}{1.7} \approx 35.$$

Определим общую протяженность вертикальных заземлителей:

$$L_g = l_g \cdot n_g, \quad (8.9)$$

$$L_g = 7 \cdot 35 = 245 \text{ м.}$$

Определим значение относительной глубины погружения вертикальных заземлителей по формуле:

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

$$\frac{7 + 0.7}{\sqrt{3688}} = 0.127.$$

Определим значение суммарного сопротивления для сложного заземлителя:

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

$$R_3 = 0.337 \cdot \frac{50}{\sqrt{3688}} + \frac{50}{634 + 245} = 0.33 \text{ Ом,}$$

где

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

$$A = (0.444 - 0.84 \cdot 0.127) = 0.337;$$

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

Заключение

В выпускной квалификационной работе бакалавра был решен комплекс вопросов по проектированию системы электроснабжения завода силовых агрегатов.

В ходе проектирования был осуществлен расчет ожидаемых максимальных нагрузок по предприятию, суммарная расчетная активная нагрузка составила 32,3 МВт. На примере ремонтно-литейного цеха был произведен выбор цеховых трансформаторов, по наименьшим приведенным затратам была выбрана к установке цеховая КТП с двумя силовыми трансформаторами ТМГ -1600/10/0,4, двумя конденсаторными установками 0,4 кВ типа АУКРМ 600 квар и двумя конденсаторными установками 10,5 кВ типа УКРП57 450 квар. На главной понизительной подстанции были приняты к установке два силовых трансформатора ТРДН -25000/110/10/10 с суммарными приведенными затратами 24462 тыс.руб. Показано, что комплексное использование радиальных и магистральных схем дает возможность выполнить схему распределительной сети с получением наилучших технико-экономических параметров. Рассчитаны значения токов короткого замыкания и выбрано основное электрооборудование, планируемое к установке на ГПП. Все выбранное электрооборудование было проверено на термическое и динамическое воздействие токов короткого замыкания. Произведен расчет заземления на ГПП, к установке приняты 35 вертикальных заземлителей.

Список используемых источников

1. Ушаков В.Я., Чубик П.С. Потенциал энергосбережения и его реализация на предприятиях ТЭК: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политех. университета, 2015. 388 с.
2. Бартоломей П.А. Информационное обеспечение задач электроэнергетики: учебное пособие, 2-е изд., стер. М.: Флинта, Изд-во Урал. ун-та, 2017. 108 с.
3. Непомнящий В.А. Экономические потери от нарушений электроснабжения потребителей [Электронный ресурс]. Электрон. дан. Москва : Издательский дом МЭИ, 2016. 188 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/72323> (дата обращения: 19.02.2018).
4. Ушаков В.Я. Современные проблемы электроэнергетики [Электронный ресурс] : учебное пособие. Томск: Томский политехнический университет, 2014. 447 с. URL: <http://www.iprbookshop.ru/34715.html> (дата обращения: 19.02.2018).
5. Кобелев А.В., Кочергин С.В., Печагин Е.А. Режимы работы электроэнергетических систем : учебное пособие для бакалавров и магистров направления «Электроэнергетика». Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2015. 80 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. Surya S., Wayne Beaty H. Standard Handbook for Electrical Engineers, Seventeenth Edition. - McGraw Hill Professional, 2017. 368 p.
8. Старкова Л.Е. Справочник цехового энергетика : учебно-практическое пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2013. 352 с.
9. Kotov O., Kotova E. Reconstruction variants reliability estimation of industrial area power supply system // 2016 2nd International Conference on

Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Chelyabinsk. 2016. pp. 1-4.

10.Вахнина В.В., Черненко А.Н. Проектирование систем электроснабжения : электронное учеб.-метод. пособие. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2016. 78 с. URL: https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/2976/1/Vahnina%20Chernenko_EUMI_Z.pdf (дата обращения: 06.03.2018).

11.Кулеева Л.И., Митрофанов С.В., Семенова Л.А. Проектирование подстанции : учебное пособие. Оренбург: Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2016. 111 с.

12.Кудрин Б.И. Электроснабжение: учебник. М.: Феникс, 2018. 382 с.

13.Шеховцов В.П. Электрическое и электромеханическое оборудование : учебник, 3-е изд. М. : ИНФРА-М, 2018. 407 с.

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

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

16.Кузнецов С.М. Проектирование тяговых и трансформаторных подстанций : учебное пособие. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2013. 92 с.

17.Михайлов В.Е. Современная электросеть. СПб. : Наука и Техника, 2013. 256 с.

18.Luzyanin I., Petrochenkov A. Regarding developing of program-technical system for analyzing operating modes of power-supply systems in oil producing companies // 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus). St. Petersburg. 2017. pp. 1553-1557.

19.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.

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

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

22. Дьяков А.Ф. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике: учебник для вузов. Москва : Издательский дом МЭИ, 2016. 543 с.