

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

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электроснабжение

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Электроснабжение производства «Капролактам» ПАО «КуйбышевАзот»

Студент

Д.И. Ухов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., В.С. Романов

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

Тольятти 2021

Аннотация

В выпускной квалификационной работе разработан проект электроснабжения производства «Капролактам» ПАО «КуйбышевАзот». Разработана энергоэффективная система электроснабжения, отвечающая требованиям надежности, безопасности, экологичности и ремонтпригодности в соответствии действующей на данный момент нормативно-технической документацией и нормами проектирования.

Основной идеей работы стоит решение проблемы надёжного электроснабжения производства химической промышленности по выпуску продукта капролактама. Поднимаются вопросы экономного расходования энергоресурсов.

В работе поэтапно представлены стадии разработки и проектирования системы электроснабжения – произведен расчет электрических нагрузок производства, позволяющий произвести выбор и сравнение силовых трансформаторов отдельно для каждого цеха рассматриваемого производства. Анализ графиков электрических нагрузок позволил произвести расчет мощности и количества трансформаторов для ГПП.

Проработаны варианты схемы электроснабжения с точки зрения надёжности, произведён технико-экономический расчет по условию приведенных затрат, при выборе силовых трансформаторов и компенсирующих устройств.

Выбор схемы электроснабжения позволил произвести расчет токов короткого замыкания на уровнях классов напряжений 110кВ, 6кВ и 0,4кВ. Полученные значения использовались для выбора, а так же проверки коммутационного и защитного оборудования объекта проектирования.

Объем работы – 51 страница машинописного текста, 8 рисунков, 6 таблиц. Графическая часть состоит из 6 чертежей формата А1.

Содержание

Введение.....	4
1 Описание продукции цеха «Капролактам» ПАО «КуйбышевАзот».....	5
2 Расчет электрических нагрузок	6
3 Расчёт производственного освещения	10
4 Выбор схемы электрических соединений	13
5 Выбор числа и мощности цеховых КТП	14
6 Выбор типа, числа и мощности трансформаторов ГПП	22
7 Выбор места для установки ГПП	27
8 Расчёт токов КЗ	30
8.1 Расчет токов КЗ на стороне 110 кВ	30
8.2 Расчет токов КЗ на стороне 6 кВ	31
8.3 Расчет токов КЗ на стороне 0,4 кВ	33
9 Выбор и проверка электрооборудования производства	36
9.1 Расчет электрооборудования на стороне 110 кВ.....	36
9.2 Расчет электрооборудования на стороне 6 кВ.....	40
9.3 Расчет электрооборудования на стороне 0,4 кВ.....	44
10 Расчет молниезащиты ГПП.....	46
Заключение.....	47
Список используемых источников.....	49

Введение

Вопрос повышения надежности системы электроснабжения промышленных предприятий, занимает ключевую позицию в рамках технического перевооружения и инновационного развития промышленной отрасли и энергетики РФ. Развитие сетевой инфраструктуры на промышленных предприятиях создает предпосылки к развитию промышленных площадок, увеличению производства и повышения производительности предприятий за счет обеспечения надежности системы электроснабжения вследствие снижения аварийных ремонтов электрооборудования.

В выпускной квалификационной работе представлена система электроснабжения производства «Капролактама», электрические приёмники которого относятся к первой категории надёжности. К данной категории надёжности производства предъявляются жесткие требования по качеству электроэнергии, по надежности электроснабжения. Объекты химической промышленности относятся к категории опасных производственных объектов, поэтому надежность и безаварийность таких объектов определяет экологическую безопасность не только региона, но и страны в целом.

Целью представленной работы является разработка системы электроснабжения производства «Капролактама» крупного химического холдинга ПАО «КуйбышевАзот».

Для реализации поставленной цели предусматривается решение следующих задач:

- произвести анализ всех потребителей производства;
- выполнить расчет электрических нагрузок;
- выбор схемы электроснабжения, равномерное распределение нагрузки потребителей с учетом резервирования;
- расчет токов короткого замыкания, выбор электрооборудования.

1 Описание продукции цеха «Капролактам» ПАО «КуйбышевАзот»

«Капролактам представляет собой белые кристаллы, хорошо растворимые в воде, спирте, эфире, бензоле. При нагревании в присутствии небольших количеств воды, спирта, аминов, органических кислот и некоторых других соединений капролактама полимеризуется с образованием полиамидной смолы, из которой получают волокно капрон. Важное свойство капролактама - способность полимеризоваться с образованием ценного полимера - поликапроамида» [1]

«Основное промышленное применение капролактама - производство полиамидных волокон и нитей (полиамид 6). Кроме того, капролактама применяется в производстве инженерных пластиков, полиамидных пленок. В небольших количествах капролактама может использоваться в образовании полиуретана и синтезе лизина, жесткие текстильные подкладки, покрытия для пленок, синтетические кожи, пластификаторы, растворители для красок.» [2]

Капролактама не является конечным продуктом предприятия, но является ключевым элементом других производств химической промышленности. В целях наращивания производства других отраслей промышленности, требуется исключить недостаток капролактама, путём внедрения дополнительного производства.

В технологическом процессе используются взрывозащищённые асинхронные электродвигатели напряжением 0,4 кВ, синхронные электродвигатели напряжением 6 кВ.

2 Расчет электрических нагрузок

Поэтапно проведём расчёт силовых нагрузок производства.

Электрические оборудование подразделяются на группы с одинаковым режимом. Суммарная мощность для каждой группы отдельно:

$$P_H = \sum_1^n p_H, \quad (1)$$

где p_H – единичная мощность электроприемников, кВт.

Учитываются мощности включения оборудования на 100%.

Произведём расчёт нагрузки электрических приёмников за наиболее загруженную смену:

$$\frac{P_M}{P_C} = k_M. \quad (2)$$

Эффективное число электрических приёмников найдем по выражению:

$$K_P = f(K_H; n_Э). \quad (3)$$

Средняя нагрузка групп электрических приёмников, включая электрических приёмников загруженные наиболее сильно в наименее загруженную смену [3, 4]:

$$P_{CM} = \sum_1^K p_{CM}. \quad (4)$$

Вся нагрузка групп электрических приёмников, учитывая

коэффициенты использования:

$$K_{и.ср} = \frac{\sum_1^n P_{см}}{\sum_1^n P_{н}}, \quad (5)$$

$$P_{м} = k_{м} \cdot \sum_1^k p_{см}. \quad (6)$$

Эффективное число электрических приёмников:

$$n_{э} = \frac{P_{н.макс}}{P_{н.мин}} \leq 3. \quad (7)$$

Примем $n_{э}=4$.

При $n_{э} > 3$ и $k_{и} \geq 0,2$ эффективное число электроприёмников также определяется по формуле:

$$n_{э} = \frac{2 \cdot \sum_1^n p_{н}}{P_{н.макс}}, \quad (8)$$

Произведём расчет реактивной нагрузки за наиболее загруженную смену. Значения $\cos\varphi / tg\varphi$ - берутся из справочных данных [5].

$$Q_{см} = P_{см} \cdot tg\varphi, \quad (9)$$

$$n_{э} \leq 10, Q_{м} = 1,1 \cdot Q_{см} \text{ и } n_{э} > 10, Q_{м} = Q_{см}.$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 1.

Вывод: выполнен расчет силовых нагрузок цеха производства «Капролактам» ПАО «КуйбышевАзот».

Таблица 1 – Расчет нагрузок производства «Капролактама»

Исходные данные							Расчетные величины		K_m	Расчётная мощность		
Наименование		N ЭП, шт.	$\sum P_H$, кВт	K_u	$\cos\varphi$	$tg\varphi$	P_C , кВт	Q_C , кВАр		P_P , кВт	Q_P , кВАр	S_P , кВА
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
П/ст №1	Асинхронный эл. двигатель	10	110	0,64	0,82	0,72						
		5	75	0,66	0,71	0,71						
		5	30	0,65	0,91	0,66						
		2	12	0,60	0,83	0,82						
Всего:		22	1649	0,63	0,82	0,72	1077	771	0,85	961	660	1150
П/ст №2	Асинхронный эл. двигатель	10	200	0,70	0,84	0,71						
		5	90	0,66	0,80	0,51						
		5	29,6	0,76	0,82	0,61						
Всего:		20	2598	0,71	0,84	0,62	1838	1119	0,80	1529	888	1719
П/ст №3	Асинхронный эл. двигатель	4	100	0,42	0,82	1,42						
		33	45	0,62	0,74	0,72						
		15	30	0,66	0,66	0,84						
		8	25	0,3	0,60	1,5						
Всего:		60	2536	0,41	0,70	1,12	1052	1178	1,0	974,1	1178	1582
П/ст №4	Асинхронный эл. двигатель	15	45	0,66	0,72	0,82						
		10	20	0,75	0,66	0,78						
		4	43,5	0,82	0,82	0,79						
Всего:		29	1012	0,76	0,76	0,79	750	587	1,02	850,9	599	969
П/ст №5	Асинхронный эл. двигатель	10	200	0,70	0,66	0,69						
		12	45	0,78	0,75	0,73						
Всего:		22	2540	0,74	0,71	0,71	2157	2262	0,80	1555,2	1090	1801

Продолжение таблицы 1

П/ст №6	Асинхронный эл. двигатель	10	110	0,64	0,82	0,72						
		15	75	0,66	0,81	0,71						
		13	15	0,8	0,83	0,69						
Всего:		38	2430	0,72	0,81	0,70	1938	1503	0,85	1591,3	1278	1885
П/ст №7	Асинхронный эл. двигатель	10	110	0,44	0,52	1,12						
		18	75	0,66	0,71	1,01						
		10	15	0,62	0,65	0,94						
		7	8,5	0,61	0,63	0,93						
Всего:		45	2659	0,52	0,67	1,02	1332	1440	1,05	1515,7	1512	1759
Итого:										8977	7205	12069

3 Расчёт производственного освещения

Произведём расчёт освещения для цеха №1, длина помещения = 60м, ширина = 36м, площадь помещения = 2160м. Нормы освещённости для производственных помещений цехов «Капролактам» - 150 ЛК. Коэффициент запаса для светодиодов = 1,1, коэффициент использования светового потока = 0,7, коэффициент минимальной освещённости – 1,1.

Найдём расчётную высоту:

$$h_{\text{расч}} = H - h_c - h_p = 6 - 0,5 = 5,5 \text{ м}, \quad (10)$$

где H – высота помещения, м;

h_c – высота свеса лампы от потолка помещения, м;

h_p – высота рабочей поверхности от пола, м;

λ_c – коэффициент минимальной освещённости.

В расстояние между светильниками [6]:

$$L = \lambda_c \cdot h_{\text{расч}} = 1,1 \cdot 5,5 = 6 \text{ м}. \quad (11)$$

Выясним количество рядов светильников:

$$n = \frac{B-x}{L} = \frac{36-3}{6} = 5,5, \quad (12)$$

где B – ширина помещения, м;

x – расстояние от края помещения, м.

Принимаем количество рядов 6.

Индекс помещения:

$$i = \frac{A \cdot B}{h_{\text{расч}} \cdot (A+B)} = \frac{60 \cdot 36}{6 \cdot (60+36)} = 4, \quad (13)$$

где A – длина помещения, м.

По справочным данным коэффициент использования светового потока $\eta = 0,65$ [7].

Выбираются взрывозащищённые ДСП02-ГЗС 50 Вт, со световым потоком 6000 Лм. Данные светильники имеют надёжную защиту от воздействия агрессивной среды, имеют отличные показатели освещения, имеют универсальное крепление, а также имеют широкий диапазон рабочих температур от -60 до $+60$ °С [8]. Включение освещения осуществляется кнопками включения отдельно для каждого ряда, по мере надобности из не технологического помещения.

Произведём расчёт требуемого суммарного освещения:

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{E_{min} \cdot k \cdot S \cdot z}{n \cdot \eta} = \frac{150 \cdot 1,1 \cdot 2160 \cdot 1,1}{6 \cdot 0,65} = 120627 \text{ Лм.} \quad (14)$$

Произведём расчёт количества светильников ДСП02-ГЗС в каждом ряду:

$$N = \frac{\Phi_{\Sigma}}{\Phi_{л}} = \frac{120627}{6000} = 20. \quad (15)$$

Принимаем количество светильников в каждом ряду 20 шт.

Произведём расчёт требуемого светового потока одного светильника [9]:

$$\Phi = \frac{E_{min} \cdot k \cdot S \cdot z}{N \cdot n \cdot \eta} = \frac{150 \cdot 1,1 \cdot 2160 \cdot 1,1}{20 \cdot 6 \cdot 0,65} = 5026 \text{ Лм.} \quad (16)$$

Расчётный световой поток светильников ДСП02-ГЗС удовлетворяет требуемому минимальному световому потоку.

Суммарная мощность светильников:

$$P = N \cdot n \cdot P_{CB} = 20 \cdot 6 \cdot 0,05 = 6 \text{ кВт.} \quad (17)$$

Внешний выбранных светильников приведен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Светильник ДСП02-ГЗС 50 Вт 1ExdIICT6

Расчёт количества светильников остальных производственных помещения произведём таким же методом и представим полученные данные в таблице 2

Таблица 2 – Расчётное освещение цехов производства

№ Цеха	D, м	W, м	H, м	N, шт	P, кВт
1	60	36	6	120	6
2	90	36	6	180	9
3	120	36	6	240	12
4	120	36	6	240	12
5	90	36	6	180	9
6	60	36	6	120	6
7	60	36	6	120	6

Вывод: произвели светотехнические расчеты для внутрицеховых помещений проектируемого объекта, подобрали энергоэффективные светодиодные светильники взрывозащищённого исполнения.

4 Выбор схемы электрических соединений

Производство «Капролактама» имеет два независимых источника электроэнергии, для обеспечения бесперебойного электроснабжения технологических установок химического производства [10].

Первый источник – тольяттинская ТЭЦ, второй источник ГЭС. От них на ГПП предприятия приходит питание напряжением 110 кВ и, преобразуется в питание напряжением 6 кВ.

Так как на производстве имеется большое количество высоковольтных электродвигателей, на номинальное рабочее напряжение 6 кВ, то планировать распределительную систему электроснабжения производства следует так же на номинальное напряжение 6 кВ.

Часть электроустановок производства рассчитана на номинальное напряжение 380/220В, в связи с этим цеховые КТП будут оборудованы трансформаторами на напряжение 6 кВ/0,4 кВ.

На ГПП будут установлены трансформаторы с глубоким вводом и масляным охлаждением.

Распределительное устройство будет оборудовано секционными ячейками, с питанием от двух радиальных линий.

При отключении первой линии, с помощью автоматического ввода резерва первая линия получит питание от второй.

Вывод по разделу: выяснили, что производство «Капролактама» будет иметь два независимых источника питания, ГПП 110/6 кВ, внутрицеховые КТП 6/0,4 кВ.

5 Выбор числа и мощности цеховых КТП

Для выбора числа и мощностей цеховых КТП на основании данных из таблицы – 1, произведём расчёт компенсации реактивной мощности.

Данные для П/СТ №1 $Q_p = 660,1$ кВАр, $P_p = 921$ кВт, $S_p = 1150$ кВА, $T_m = 6050$ ч, $Q_{min} = 510,1$ кВАр.

С П/СТ №1 получают питание четыре синхронных электродвигателя (СД) со следующими параметрами: $P_H = 1020$ кВт, $Q_H = 509$ кВАр, $\cos\varphi = 0,89$, $D_1 = 6,13$ кВт, $D_2 = 4,02$ кВт, $k_n = 0,71$, $a_M = 1,351$.

Произведём расчёт реактивной мощности П/СТ №1 по выражению (18):

$$Q_{сд} = a_M \cdot N \cdot Q_N = 1,35 \cdot 4 \cdot 509 = 2748,9 \text{ кВАр.} \quad (18)$$

Произведём расчёт выходной реактивной мощности:

$$Q'_{э1} = Q_p - 0,7 \cdot Q_{сд} = 660,1 - 0,71 \cdot 2748,9 = -1264,1 \text{ кВАр,} \quad (19)$$

$$Q'_{э2} = Q_{min} - (Q_p - Q'_{э1}) = 510,1 - (660,1 + 1264,1) = -1414,1 \text{ кВАр,} \quad (20)$$

$$Q''_{э2} = Q_{min} + Q_k = 510,1 + 0 = 510,1 \text{ кВАр,} \quad (21)$$

$$Q''_{э1} = a \cdot P_p = 0,28 \cdot 921 = 257,88 \text{ кВАр.} \quad (22)$$

По рассчитанным данным получаем $Q'_{э1} = 257,88$ кВАр, $Q'_{э2} = 510$ кВАр.

Произведём расчёт полной мощности компенсирующего устройства [11]:

$$Q_{ку.max} = 1,11 \cdot Q_p - Q'_{э1} = 1,11 \cdot 660,1 - 257,88 = 468,23 \text{ кВАр.} \quad (23)$$

Определим мощность нерегулируемых компенсирующих устройств:

$$Q_{ky.min} = Q_{min} - Q''_{32} = 510,1 - 510,1 = 0 \text{ кВАр.} \quad (24)$$

Делаем вывод, что компенсирующие устройства должны иметь функцию регулирования мощности.

На основе полученных данных о компенсации реактивной мощности, произведём подбор трансформаторов [12, 15].

Учитывая расчётную мощность трансформатора $P_p = 921$ кВА, по справочным данным ближайшее подходящий по мощности и коэффициенту загрузки трансформатор ($S_H = 1000$ кВА и $K_3 = 0,71$), произведём расчёт наименьшее разрешённое к установке число трансформаторов [14]:

$$N_T = \frac{P_p}{0,71 \cdot S_H} = \frac{921}{0,71 \cdot 1000} = 1,32. \quad (25)$$

Минимальное число трансформаторов для установки 2.

Произведём расчёт реактивной мощности трансформатора на стороне низшего напряжения (НН) [13]:

$$Q_{вн} = \sqrt{(2 \cdot 0,71 \cdot 1000)^2 - 921^2} = 1080,81 \text{ кВАр.} \quad (26)$$

Произведём расчёт реактивной мощности трансформатора на стороне высшего напряжения (ВН):

$$Q_{вн} = Q_{сдр} = Q_p - Q_{31} = 660,1 - 257,88 = 402,22 \text{ кВАр.} \quad (27)$$

Произведём расчет мощности компенсирующего устройства со стороны НН:

$$Q_{кун} = Q_p - Q_{вн} = 660,1 - 1080,81 = -420,71 \text{ кВАр.} \quad (28)$$

Потребность в батареях конденсаторных установок отсутствует.

Произведём расчёт стоимости выработки реактивной мощности в сеть 380 В синхронными двигателями при: $K_p = 3299$ руб., $C_o = 929$ руб., $E_p = 0,15$.

$$Z_0 = E_p \cdot N \cdot K_p = 0,15 \cdot 2 \cdot 3299 = 989,7 \text{ руб.} \quad (29)$$

где « E_p – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений» [22];

« K_p – цена регулируемых приборов» [21];

« C_o – удельная стоимость потерь электроэнергии» [22].

$$Z_1 = C_o \cdot \left(\frac{D_1}{Q_H} + 2 \cdot \frac{D_2 \cdot Q_{\text{пр}}}{Q_H^2 \cdot N} \right) = 929 \cdot \left(\frac{6,13}{509} + 2 \cdot \frac{4,02 \cdot 402,22}{509^2 \cdot 4} \right) = 14,09 \text{ руб/кВАр,} \quad (30)$$

$$Z_2 = C_o \cdot \left(\frac{D_2}{Q_H^2 \cdot N} \right) = 929 \cdot \left(\frac{4,02}{509^2 \cdot 4} \right) = 0,0036 \text{ руб/кВАр,} \quad (31)$$

$$Z_{\text{кУ}} = Z_1 \cdot Q_{\text{пр}} + Z_2 \cdot Q_{\text{пр}}^2 + Z_0 = 7240 \text{ руб.} \quad (32)$$

Произведём подсчёт стоимости комплектной трансформаторной подстанции с двумя трансформаторами ТМЗ 2х1000 кВА.

Выработка трансформатора за год работы составляет: 365 дней · 24 ч = 8760 ч/год.

По следующим данным $T_M = 6550$ ч, $a = 2669$ руб/кВт, $\beta = 0,71435$ руб/кВт произведём расчёт момента наибольшего ущерба в течении рабочего года по следующим выражениям:

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_M}{10^4} \right)^2 \cdot 876 = 5316, \quad (33)$$

$$C_o = \left(\beta + \frac{a}{T_M} \right) \cdot \tau = 9827 \text{ руб/кВт} \cdot \text{год.} \quad (34)$$

Подсчитаем удельную стоимость ущерба в ТМЗ 1000 кВА по

техническим характеристикам от производителя (потери холостого хода = 2,51 кВт, потери короткого замыкания составляет 11,9 кВт), индекс - E=0,33:

$$C = \left(\beta + \frac{a}{T_M} \right) \cdot 5316 = 5963 \text{ руб/кВт} \cdot \text{год}. \quad (35)$$

Цена 2КТП 1000 кВА (комплектная двух трансформаторная подстанция) по данным на сентябрь 2021 года составляет 677,73 т. руб.

Полная стоимость электроэнергии при эксплуатации КТП:

$$Z_{\text{КТП}} = E \cdot K_{\text{ТП}} + (C_0 \cdot 10^{-3} \cdot N_T \cdot P_{\text{хх}} + C \cdot 10^{-3} \cdot N_T \cdot P_{\text{КЗ}}), \quad (36)$$

$$Z_{\Sigma} = Z_{\text{кУ}} + Z_{\text{КТП}} = 7,24 + 414,90 = 422,14 \text{ т. руб.} \quad (37)$$

Для П./СТ. №1 выбираем двух трансформаторную комплектную подстанцию 2КТП 1000 кВА с трансформаторами ТМЗ 2х1000 кВА, внешний вид которых представлен на рисунке 2 [17].



Рисунок 2 – Общий вид трансформатора ТМЗ 1000 кВА

Данные для П./СТ. №2 $Q_p = 888 \text{ кВАр}$, $P_p = 1529 \text{ кВт}$, $S_p = 1719 \text{ кВА}$, $T_M = 6850 \text{ ч}$, $Q_{\text{min}} = 659,37 \text{ кВАр}$.

От П./СТ №2 получают питание десять синхронных электродвигателей

(СД) со следующими параметрами: $P_H = 650$ кВт, $Q_H = 330$ кВАр, $\cos\varphi = 0,89$, $D_1 = 5,58$ кВт, $D_2 = 4,12$ кВт, $k_{и} = 0,71$, $a_M = 1,351$.

Произведём расчёт реактивной мощности, производимой синхронными двигателями ПС №2:

$$Q_{сд} = a_M \cdot N \cdot Q_N = 1,35 \cdot 10 \cdot 330 = 4455 \text{ кВАр.} \quad (38)$$

Произведём расчёт выходной реактивной мощности [18]:

$$Q'_{э1} = Q_P - 0,7 \cdot Q_{сд} = 888 - 0,71 \cdot 4455 = -2275,05 \text{ кВАр,} \quad (39)$$

$$Q''_{э1} = a \cdot P_p = 0,28 \cdot 1529 = 428,12 \text{ кВАр.} \quad (40)$$

Определяем $Q'_{э1} = Q''_{э1} = 428,12$ кВАр;

$$Q'_{э2} = Q_{\min} - (Q_P - Q'_{э1}) = 199,49 \text{ кВАр,} \quad (41)$$

$$Q''_{э2} = Q_{\min} + Q_k = 659,37 + 0 = 659,37 \text{ кВАр.} \quad (42)$$

Определяем $Q'_{э2} = Q''_{э2} = 659,37$ кВАр.

Произведём расчёт полной мощности компенсирующего устройства [19]:

$$Q_{ку.max} = 1,11 \cdot Q_P - Q'_{э1} = 548,68 \text{ кВАр.} \quad (43)$$

Определим мощность нерегулируемых компенсирующих устройств:

$$Q_{ку.min} = Q_{\min} - Q''_{э2} = 659,37 - 659,37 = 0 \text{ кВАр.} \quad (44)$$

Делаем вывод, что компенсирующие устройства должны иметь функцию регулирования мощности.

На основе полученных данных о компенсации реактивной мощности, произведём подбор трансформаторов.

Учитывая расчётную мощность трансформатора $P_p = 1529$ кВА, по справочным данным ближайшее подходящий по мощности и коэффициенту загрузки трансформатор ($S_H = 1600$ кВА и $K_3 = 0,71$), произведём расчёт наименьшее разрешённое к установке число трансформаторов [20]:

$$N_T = \frac{P_p}{0,71 \cdot S_H} = \frac{1529}{0,71 \cdot 1600} = 1,34. \quad (45)$$

Минимальное число трансформаторов для установки 2.

Произведём расчёт реактивной мощности трансформатора на стороне низшего напряжения (НН):

$$Q_{вн} = \sqrt{(2 \cdot 0,71 \cdot 1600)^2 - 1529^2} = 1680,52 \text{ кВАр}. \quad (45)$$

Произведём расчёт реактивной мощности трансформатора на стороне высшего напряжения (ВН):

$$Q_{вн} = Q_{сдр} = Q_p - Q_{\varepsilon 1} = 888 - 428,12 = 459,88 \text{ кВАр}. \quad (46)$$

Произведём расчет мощности КУ со стороны НН:

$$Q_{кун} = Q_p - Q_{вн} = 888 - 1680,81 = -792,81 \text{ кВАр}. \quad (47)$$

Потребность в батареях конденсаторных установок отсутствует.

Произведём расчёт стоимости выработки реактивной мощности в сеть 380 В синхронными двигателями П/СТ №2 при:

$$z_1 = C_0 \cdot \left(\frac{D_1}{Q_H} + 2 \cdot \frac{D_2 \cdot Q_{пр}}{Q_H^2 \cdot N} \right) = 17,32 \text{ руб/кВАр}, \quad (48)$$

$$Z_2 = C_0 \cdot \left(\frac{D_2}{Q_H^2 \cdot N} \right) = 929 \cdot \left(\frac{4,12}{330^2 \cdot 10} \right) = 0,0035 \text{ руб / кВАр}, \quad (49)$$

$$Z_{\text{ку}} = Z_1 \cdot Q_{\text{ПР}} + Z_2 \cdot Q_{\text{ПР}}^2 + Z_0 = 10685 \text{ руб.} \quad (50)$$

Произведём подсчёт стоимости комплектной трансформаторной подстанции с двумя трансформаторами ТМЗ 2х1600 кВА

Выработка трансформатора за год работы составляет: 365 дней · 24 ч = 8760 ч/год.

По следующим данным $T_M = 6750 \text{ ч}$, $a = 2669 \text{ руб/кВт}$, $\beta = 0,71435 \text{ руб/кВт}$ произведём расчёт момента наибольшего ущерба в течении рабочего года:

$$\tau = \left(0,1240 + \frac{T_M}{10^4} \right)^2 \cdot 8760 = 5592 \text{ ч}, \quad (51)$$

$$C_0 = \left(\beta + \frac{a}{T_M} \right) \cdot 8760 = 9721 \text{ руб/кВт} \cdot \text{год.} \quad (52)$$

Подсчитаем удельную стоимость ущерба в ТМЗ 1600 кВА по техническим характеристикам от производителя (потери холостого хода = 1,75 кВт, потери короткого замыкания составляет 18 кВт, индекс $E=0,33$):

$$C = \left(\beta + \frac{a}{T_M} \right) \cdot \tau = 6206 \text{ руб/кВт} \cdot \text{год.} \quad (53)$$

Цена 2КТП 1600 кВА (комплектная двух трансформаторная подстанция) по данным на сентябрь 2021 года составляет 713,20 т. руб.

Полная стоимость электроэнергии при эксплуатации КТП:

$$Z_{\text{КТП}} = E \cdot K_{\text{ТП}} + (C_0 \cdot 10^{-3} \cdot N_T \cdot P_{\text{хх}} + C \cdot 10^{-3} \cdot N_T \cdot P_{\text{кз}}), \quad (54)$$

$$Z_{\Sigma} = Z_{\text{ку}} + Z_{\text{КТП}} = 10,685 + 492,80 = 503,48 \text{ т. руб.} \quad (55)$$

Для П/СТ №2 выбираем двух трансформаторную комплектную

подстанцию КТП 1600 кВА с трансформаторами ТМЗ 2х1600 кВА, внешний вид которых представлен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Общий вид трансформатора ТМЗ 1600 кВА

Основываясь на данных из таблицы 7 «приложение Б» для остальных ПС подбираем трансформаторы, соответствующие расчетной мощности остальных подстанций, для наглядности занесём в таблицу 3.

Таблица 3 – Выбранные трансформаторы производства «Капролактam»

№ П./СТ.	Тип и мощность трансформаторов
П./СТ. №1	ТМЗ 2х1000 кВА
П./СТ. №2	ТМЗ 2х1600 кВА
П./СТ. №3	ТМЗ 2х1000 кВА
П./СТ. №4	ТМЗ 2х1000 кВА
П./СТ. №5	ТМЗ 2х1600 кВА
П./СТ. №6	ТМЗ 2х1600 кВА
П./СТ. №7	ТМЗ 2х1600 кВА

Вывод: произвели расчет и выбор силовых трансформаторов для КТП производства «Капролактam».

6 Выбор типа, числа и мощности трансформаторов ГПП

Главная понизительная подстанция (ГПП) производства понижает напряжение со 110 кВ до 6 кВ. С шин распределительного устройства 6кВ получают питание потребители первой категории надежности. В соответствии с действующими правилами, нормами проектирования и электроснабжения потребителей, подстанция должна иметь 2 независимых источника питания.

На предприятии электроприёмники большой мощности могут включаться в один промежуток времени и могут сильно нагружать электросеть [21, 22]. Питание имеет переменную резкую характеристику, поэтому главная понизительная подстанция оснащается трансформаторами с расщеплённой обмоткой. У ГПП существует предел перегрузки сорока процентов от номинальной мощности в аварийных ситуациях.

$$S_{\text{номТ}} \geq 0,7 \cdot S_{\text{max}} \geq 0,7 \cdot 44998,43 = 31498,9 \text{ кВА.} \quad (56)$$

По градации мощности из нормативных документов ГОСТ 11920 – 85 и ГОСТ 12965 – 85, подходящее значение номинальной мощности трансформатора ГПП ровняется 40 МВА.

Произведём расчёт потерь активной мощности в трансформаторе на XX:

$$P'_T = P_x + K_{un} \cdot Q_x = 33 + 0,06 \cdot 231 = 47 \text{ кВт,} \quad (57)$$

$$Q_x \frac{I_x\%}{100} S_{\text{нт}} = \frac{0,60}{100} \cdot 40 \text{ МВА} = 240 \text{ кВАр,} \quad (58)$$

$$K_{3В} = \frac{S_{\text{нагрузки}}}{S_{\text{номТ}}} = \frac{31,5 \text{ МВА}}{40 \text{ МВА}} = 0,7875, \quad (59)$$

$$K_{3Н1} = \frac{0,5 \cdot S_{\text{нагрузки}}}{S_{\text{номТ}}} = \frac{15,75 \text{ МВА}}{40 \text{ МВА}} = 0,39, \quad (60)$$

$$K_{3Н1} = K_{3Н2} = 0,39. \quad (61)$$

Коэффициент $K_{un} = 0,06 \text{ кВт/кВАр}$.

Произведём расчёт потерь активной мощности в трансформаторе в

режиме КЗ:

$$P'_{KB} = P_{KB} + K_{un} \cdot Q_{KB} = 0 + 0,06 \cdot 520 = 31,20 \text{ кВт}, \quad (62)$$

$$P'_{KH} = P_{KH} + K_{un} \cdot Q_{KH} = 165 + 0,06 \cdot 7360 = 606,6 \text{ кВт}, \quad (63)$$

$$Q_x \frac{U_{KB\%}}{100} \cdot S_{HT} = \frac{1,3}{100} \cdot 40 \text{ МВА} = 520 \text{ кВАр}, \quad (64)$$

$$U_{KB\%} = 0,1250 \cdot U_{BH-HH} = 0,1250 \cdot 10,50 = 1,3, \quad (65)$$

$$Q_{KHH1} = Q_{KHH2} = \frac{U_{KHH}}{100} S_{НОМ.Т} = \frac{18,4}{100} \cdot 40 \text{ МВА}, = 7360 \text{ кВАр}, \quad (66)$$

$$U_{KHH1} = U_{KHH2} = 1,750 \cdot U_{BH=HH} = 0,1250 \cdot 10,50 = 18,4, \quad (67)$$

$$P_m = 47 + 0,7875^2 + 31,2 + (0,39^2 \cdot 606,6) \cdot 2 = 263,35 \text{ кВт}. \quad (68)$$

На рисунке 4 представлен упрощенный график суточной нагрузки, по нему произведём расчёт восьми ступеней работы ГПП:

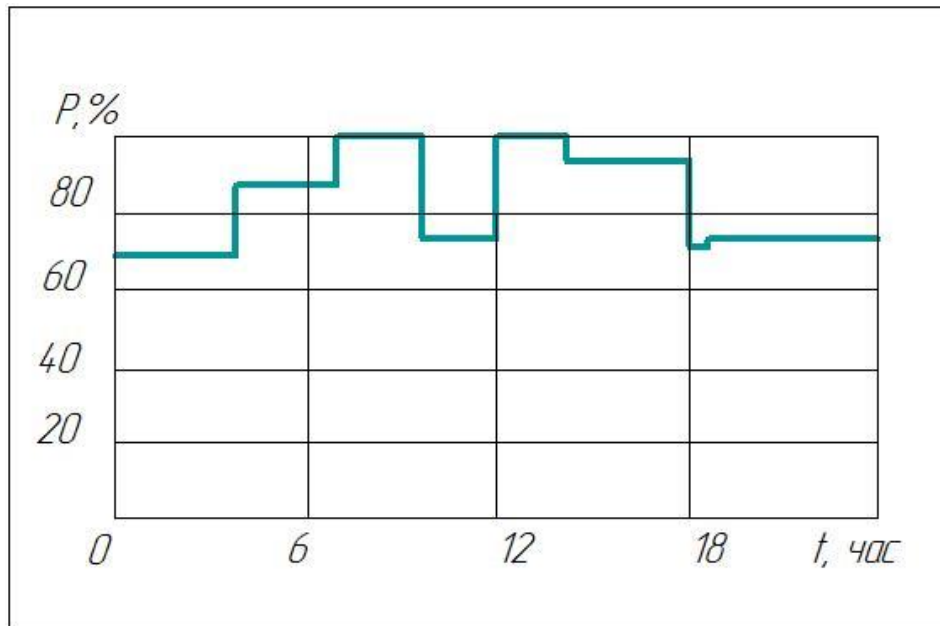


Рисунок 4 – Упрощённый исходный график суточной нагрузки

Преобразуем суточный график - в эквивалентный двухступенчатый, результаты приведены на рисунке 5.

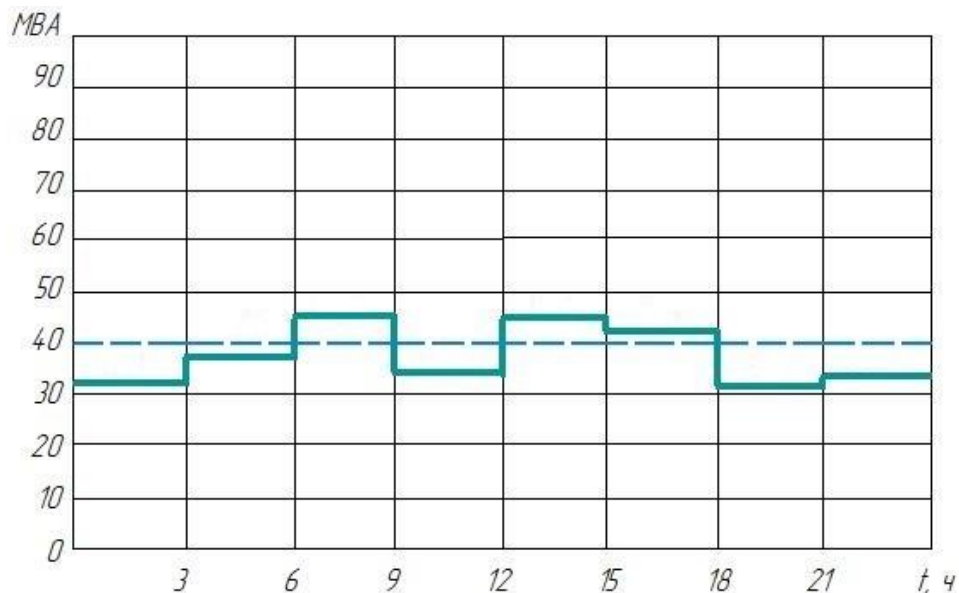


Рисунок 5 – Преобразованный график суточной нагрузки в двухступенчатый ступенчатый эквивалентный

После преобразования суточного графика в двух ступенчатый график, произведём проверку трансформатора по перегрузке в аварийном режиме. К режиму первой ступени отнесём работу трансформатора на промежутках t : 0-3, 3-6, 9-12, 18-21, 21-24; ко второй на промежутках t : 6-9, 12-15, 15-18.

$$S_{3П/СТ} \frac{S_{max} \cdot P\%}{100\%} = \frac{44,99 \text{ MVA} \cdot 100}{100\%} = 44,99 \text{ MVA}, \quad (69)$$

$$S_{4П/СТ} \frac{S_{max} \cdot P\%}{100\%} = \frac{44,99 \text{ MVA} \cdot 70}{100\%} = 31,49 \text{ MVA}, \quad (70)$$

$$S_{5П/СТ} \frac{S_{max} \cdot P\%}{100\%} = \frac{44,99 \text{ MVA} \cdot 100}{100\%} = 44,99 \text{ MVA}, \quad (71)$$

$$S_{6П/СТ} \frac{S_{max} \cdot P\%}{100\%} = \frac{44,99 \text{ MVA} \cdot 93}{100\%} = 41,84 \text{ MVA}, \quad (72)$$

$$S_{7П/СТ} \frac{S_{max} \cdot P\%}{100\%} = \frac{44,99 \text{ MVA} \cdot 68}{100\%} = 30,59 \text{ MVA}, \quad (73)$$

$$S_{8П/СТ} = \frac{S_{max} \cdot P\%}{100\%} = \frac{44,99 \text{ MVA} \cdot 70}{100\%} = 31,49 \text{ MVA}. \quad (74)$$

Произведём расчёт начального значения нагрузки трансформатора в промежутках t :

$$K_1 = \frac{1}{S_{НОМ}} \sqrt{\frac{S_1^2 \cdot \Delta t_1 + \dots + S_n^2 \cdot \Delta t_n}{\Delta t_1 + \dots + \Delta t_n}}, \quad (75)$$

$$K_1 = \frac{1}{40} \sqrt{\frac{30,59^2 + 38,69^2 + 31,49^2 + 31,49^2 + 30,59^2}{15} \cdot 3} = 0,82.$$

Произведём расчёт предварительного значения нагрузки трансформатора в промежутках t [12]:

$$K'_2 = \frac{1}{S_{НОМ}} \sqrt{\frac{S_1^2 \cdot \Delta t_1 + \dots + S_n^2 \cdot \Delta t_n}{\Delta t_1 + \dots + \Delta t_n}}, \quad (76)$$

$$K'_2 = \frac{1}{40} \sqrt{\frac{44,99^2 + 44,99^2 + 41,84^2}{9} \cdot 3} = 1,099,$$

$$K_{\max} = \frac{S_{\max}}{S_{НОМТ}} = \frac{44,99}{40} = 1,12475. \quad (77)$$

Исходя из того, что $K'_2 \geq 0,9 \cdot K_{\max}$, делаем вывод, что $K_2 = K'_2$.

Произведём расчёт времени перегрузки трансформатора ГПП:

$$t_{\text{перегрузки}} = \frac{(K'_2)^2 \cdot t'}{(0,9 \cdot K_{\max})^2} = \frac{1,099^2 \cdot 9}{(0,9 \cdot 1,12475)^2} = 10,6 \text{ ч.} \quad (78)$$

Под продолжительными допустимыми перегрузками в аварийном режиме работы, системы типа (Д) для охлаждения трансформатора будет достаточно [8]. Так как $K_2 = 1,099$, $K_{2\text{дополн.}} = 1,4$; условие $K_2 \leq K_{2\text{дополн.}}$ соблюдается, для ГПП трансформатор 2 ТРДН 40000/110/6,3/6,3 по всем параметрам подходит.

Российский производитель силовых трансформаторов УЭТМ располагает в своих каталогах подходящим оборудованием, которое полностью сертифицировано, на которое предоставляется гарантия и которое отвечает всем требованиям ГОСТ [10, 19]. На рисунке 6 представлен внешний вид выбранного трансформатора.



Рисунок 6 – Внешний вид ТРДН 40000/110/6,3/6,3 производства УЭТМ

Вывод по разделу: Произвели расчёты нагрузок для ГПП, суточный график нагрузок преобразовали в 2-х ступенчатый эквивалентный, произвели расчёт номинальной мощности для подбора трансформаторов, по результатам исследований выбрали трансформаторы компании «УЭТМ» ТРДН 40000/110/6,3/6,3.

7 Выбор места для установки ГПП

Для выбора ГПП произведём расчёты согласно данным таблицы 1, результаты сведём в таблицу 4.

Таблица 4 – Мощности трансформаторных подстанций «Капролактам»

№П/СТ	1	2	3	4	5	6	7
P_p , кВт	961	1529	974	851	1555	1591	1516
Q_p , кВАр	660	888	1178	599	1090	1278	1512

Произведём расчёт радиусов R_p и Q_p . Наименьшая нагрузка на подстанции №4, для минимальной нагрузки примем $R=15$ м, отсюда:

$$m_a = \frac{P_{п/ст1}}{\pi \cdot R^2} = \frac{851}{3,14 \cdot 15^2} = 1,2 \text{ кВт/м}^2. \quad (79)$$

Определим радиус для максимально загруженных трансформаторных подстанций:

$$R_{пс/тn} = \sqrt{\frac{P_{пс/тn}}{\pi \cdot m_a}}, \quad (80)$$

$$R_{пс/т6} = \sqrt{\frac{1591}{3,14 \cdot 1,2}} = 21 \text{ м,}$$

$$R_{п/стQn} = \sqrt{\frac{Q_{псn}}{\pi \cdot m_a}}, \quad (81)$$

$$R_{\frac{п}{ст} Q6} = \sqrt{\frac{1278}{3,14 \cdot 1,9}} = 18 \text{ м.}$$

По такому же методу произведём расчёт радиусов мощностей нагрузки для остальных трансформаторных подстанций и занесём их в таблицу 5.

Таблица 5 – Радиусы нагрузок трансформаторных подстанций производства «Капролактама»

№ ПС	1	2	3	4	5	6	7
X, м	770	550	560	540	540	350	350
Y, м	390	400	190	450	190	230	400
P _p , кВт	961	1529	974	851	1555	1591	1516
R _A , м	16	20	16	15	20	21	20
Q _p , кВАр	660	888	1178	599	1090	1278	1512
R _p , м	13	15	15	13	17	18	20

Выясним расчётный центр нагрузок по оси X:

$$X_A = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot X_i}{\sum_{i=1}^n P_i}, \quad (82)$$

$$X_A = \frac{961 \cdot 770 + 1529 \cdot 550 + 974 \cdot 560 + 851 \cdot 540 + 1555 \cdot 540 + 1591 \cdot 350 + 1516 \cdot 350}{961 + 1529 + 974 + 851 + 1555 + 1591 + 1516} = 502 \text{ м.}$$

Выясним расчётный центр нагрузок по оси Y:

$$Y_A = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^n P_i}, \quad (83)$$

$$Y_A = \frac{961 \cdot 390 + 1529 \cdot 400 + 974 \cdot 190 + 851 \cdot 450 + 1555 \cdot 190 + 1591 \cdot 230 + 1516 \cdot 400}{961 + 1529 + 974 + 851 + 1555 + 1591 + 1516} = 314 \text{ м.}$$

На рисунке 7 схематично обозначим расположение корпусов, внутрицеховых П/СТ и укажем центр нагрузок производства.

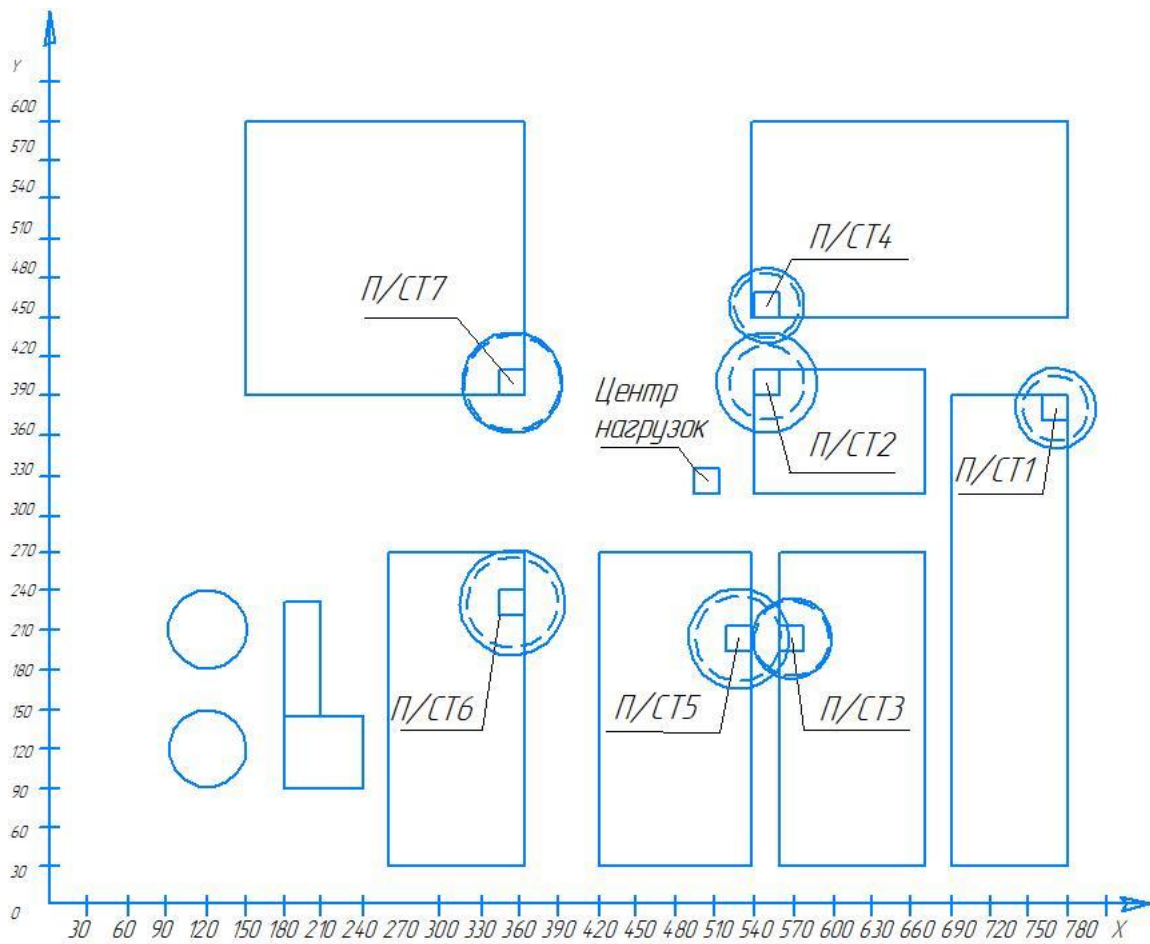


Рисунок 7 – План расположения П/СТ и центра нагрузок производства «Капролактам»

Вывод: произвели расчёт радиусов нагрузок цеховых подстанций и определили место расположения центра нагрузок производства «Капролактам».

8 Расчёт токов КЗ

Зная мощность $S_B = 1000 \text{ MVA}$ произведём расчёт сопротивления энергосистемы [4]:

$$X_{*C} = \frac{S_B}{S_{K3}} = \frac{1000}{2000} = 0,5 \text{ мОм.} \quad (84)$$

По следующим данным $X_0 = 0,181 \text{ Ом/км}$ (масло-заполненный кабель) $l = 20 \text{ км}$, произведём расчёт сопротивления кабельной линии:

$$X_{*КЛ1} = X_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{НОМ}^2} = 0,181 \cdot 20 \cdot \frac{1000}{115^2} = 0,27 \text{ мОм.} \quad (85)$$

Произведём расчёт сопротивления ТРДН-40000/110/6,3/6,3 в именованных единицах:

$$X_{*ТВ} = \frac{X_{*ТВ} \% \cdot S_B}{100 \cdot S_{ТН}} = \frac{0,7875 \cdot 1000}{100 \cdot 40} = 0,196 \text{ мОм,} \quad (86)$$

$$X_{*ТВ} \% = 0,1250 \cdot U_{КВ-H} \% = 0,1250 \cdot 6,3 = 0,7875 \text{ мОм,} \quad (87)$$

$$X_{*ТН} = \frac{X_{*ТВ} \% \cdot S_B}{100 \cdot S_{ТН}} = \frac{11,025 \cdot 1000}{100 \cdot 40} = 2,756 \text{ мОм,} \quad (88)$$

$$X_{*ТН1} \% = X_{*ТН2} \% = 1,75 \cdot U_{КВ-H} \% = 1,75 \cdot 6,3 = 11,025 \text{ мОм.} \quad (89)$$

Зная сопротивления силового трансформатора ТРДН-40000/110/6,3/6,3 продолжим дальнейшие расчеты токов КЗ по сторонам 110кВ, 6кВ, 0,4кВ.

8.1 Расчет токов КЗ на стороне 110 кВ

К1. Произведём расчёт суммарного сопротивления К1:

$$X_{*\Sigma} = X_{*C} + X_{*КЛ1} = 0,5 + 0,27 = 0,77 \text{ мОм.} \quad (90)$$

Произведём расчёт тока КЗ⁽³⁾:

$$I_{*K3}^{(3)} = \frac{E_c}{x_{*\Sigma}} = \frac{1}{0,77} = 1,30, \quad (91)$$

$$I_{*K1}^{(3)} = I_{*K3}^{(3)} \cdot \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_H} = 1,30 \cdot \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 6,53 \text{ кА}. \quad (92)$$

Произведём расчёт ударного тока, по величине $Ta1=0,045$ предварительно вычислим его коэффициент:

$$K_{уд1} = 1 + e^{-0,01/Ta1} = 1 + e^{-0,01/0,045} = 1,99, \quad (93)$$

$$I_{уд1} = \sqrt{2} \cdot K_{уд1} \cdot I_{*K1}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,99 \cdot 6,53 = 18,4 \text{ кА}. \quad (94)$$

Далее произведем аналогичные расчёты для распределительного устройства 6кВ рассматриваемого производства.

8.2 Расчет токов КЗ на стороне 6 кВ

К2. Произведём расчёт суммарного сопротивления К1:

$$x_{*\Sigma} = x_{*c} + x_{*кл1} + x_{*mB} + x_{*mH} = 3,722 \text{ МОм}. \quad (95)$$

Произведём расчёт тока КЗ⁽³⁾:

$$I_{*K32}^{(3)} = \frac{E_c}{x_{*\Sigma}} = \frac{1}{3,722} = 0,268, \quad (96)$$

$$I_{*K2}^{(3)} = I_{*K32}^{(3)} \cdot \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_H} = 0,268 \cdot \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 24,56 \text{ кА}. \quad (97)$$

Произведём расчёт КЗ для СД на стороне 6 кВ:

$$I_{CD1} = \frac{E''}{x_{*d}''} \cdot \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = 0,511 \text{ кА}, \quad (98)$$

$$I_{CD2} = \frac{E''}{x_{*d}''} \cdot \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = 0,584 \text{ кА}, \quad (99)$$

$$I_{CD3} = \frac{E''}{x_{*d}''} \cdot \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = 0,803 \text{ кА}, \quad (100)$$

$$I_{K2} = I_{CD1} + I_{CD2} + I_{CD3} + I_{*K2}^{(3)} = 26,5 \text{ кА.} \quad (101)$$

Произведём расчёт ударного тока, по величине $Ta2=0,23$ предварительно вычислим его коэффициент:

$$K_{уд2} = 1 + e^{-0,01/Ta1} = 1 + e^{-0,01/0,23} = 1,95, \quad (102)$$

$$I_{уд2} = \sqrt{2} \cdot K_{уд2} \cdot I_{*K2}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,95 \cdot 26,5 = 73,07 \text{ кА,} \quad (103)$$

$$I_{удCD} = \sqrt{2} \cdot K_{уд2} \cdot (I_{CD1} + I_{CD2} + I_{CD3}) = 5,23 \text{ кА,} \quad (104)$$

$$I_{уд2\Sigma} = I_{уд2} + I_{удCD} = 73,07 + 5,23 = 78,5 \text{ кА.} \quad (105)$$

К3. Произведём расчёт сопротивления по всей длине кабельной линии, принимая во внимание удельное сопротивление маслonaполненного кабеля $x_0=0,09$ Ом/км, длина силового кабеля $=0,75$ км и напряжение линии $6,3$ кВ:

$$X_{*KL2} = X_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{НОМ}^2} = 0,09 \cdot 0,75 \cdot \frac{1000}{6,3^2} = 1,7 \text{ мОм,} \quad (106)$$

$$X_{*\Sigma} = X_{*c} + X_{*0} + X_{KL2} + X_{*mB} + X_{*mH}, \quad (107)$$

$$X_{*\Sigma} = 0,5 + 0,09 + 0,7875 + 2,756 + 1,7 = 5,83 \text{ мОм,}$$

$$I_{*K3}^{(3)} = \frac{E_c}{X_{*\Sigma}} = \frac{1}{5,83} = 0,171, \quad (108)$$

$$I_{*K33}^{(3)} = I_{*K3}^{(3)} \cdot \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_H} = 0,171 \cdot \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 15,67 \text{ кА.} \quad (109)$$

Произведём расчёт ударного тока, по величине $Ta3=0,8$ предварительно вычислим его коэффициент:

$$K_{уд3} = 1 + e^{-0,01/Ta3} = 1 + e^{-0,01/0,8} = 1,98, \quad (110)$$

$$I_{уд3} = \sqrt{2} \cdot K_{уд3} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{*K33}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,98 \cdot 15,67 = 43,88 \text{ кА.} \quad (111)$$

Далее произведем аналогичные расчёты для распределительного устройства $0,4$ кВ рассматриваемого производства.

8.3 Расчет токов КЗ на стороне 0,4 кВ

Произведём расчёт сопротивления энергосистемы:

$$X_c = \frac{U_c}{\sqrt{3} \cdot I_{K3}^{(3)}} \cdot \left(\frac{U_6}{U_c}\right)^2 = \frac{63000}{\sqrt{3} \cdot 15,67} \cdot \left(\frac{0,4}{6,3}\right)^2 = 0,79 \text{ мОм.} \quad (112)$$

К4: произведём расчёт сопротивления ТМЗ 1000:

$$Z_T = \frac{U_c \cdot U_H^2}{S_{HT}} \cdot 10^4 = \frac{5,50 \cdot 0,4^2}{1000} \cdot 10^4 = 8,79 \text{ мОм,} \quad (113)$$

$$r_T = \frac{\Delta P_K \cdot U_{6ст}^2}{S_{HT}} \cdot 10^6 = \frac{11,9 \cdot 0,4^2}{1000} \cdot 10^6 = 1,89 \text{ мОм,} \quad (114)$$

$$x_T = \sqrt{z_T^2 - r_T^2} = \sqrt{8,79^2 - 1,89^2} = 8,61 \text{ мОм.} \quad (115)$$

Произведём расчет суммарного r активного, принимая во внимание следующие параметры: значение сопротивления катушки $I_{\text{макс. пред.}} - r_{a2} = 0,159 \text{ мОм}$; r контактов = $0,24 \text{ мОм}$, переходное $r = 14,9 \text{ мОм}$:

$$r_{\Sigma} = r_T + r_{a2} + r_K + r_n = 1,89 + 0,159 + 0,24 + 14,9 = 17,24 \text{ мОм.} \quad (116)$$

Произведём расчет суммарного, индуктивного сопротивления [13]:

$$x_{\Sigma} = x_T + x_{a2} + x_c = 8,61 + 0,79 + 0,30 = 9,7 \text{ мОм.} \quad (117)$$

Произведём расчет суммарного, полного сопротивления:

$$z_{\Sigma} = \sqrt{x_{\Sigma}^2 + r_{\Sigma}^2} = \sqrt{9,7^2 + 17,24^2} = 20,05 \text{ мОм.} \quad (118)$$

Произведём расчёт трёх фазного КЗ, после найдём значение постоянной Та4.

$$I_{K4}^{(3)} = \frac{U_c}{\sqrt{3} \cdot z_{\Sigma}} = \frac{0,4 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 20,05} = 11,7 \text{ кА}, \quad (119)$$

$$T_{a4} = \frac{x_{\Sigma}}{z_{\Sigma} \cdot \omega} = \frac{9,7}{20,05 \cdot 314} = 0,0020, \quad (120)$$

$$K_{yд4} = 1 + e^{-0,01/Ta4} = 1 + e^{-0,01/0,002} = 1,0067, \quad (121)$$

$$I_{yд4} = \sqrt{2} \cdot K_{yд4} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{*K34}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,0067 \cdot 11,7 = 16,66 \text{ кА}. \quad (122)$$

К5 произведём расчёт сопротивления кабельной линии, принимая во внимание: индуктивное $X = 0,07$, активное $R_0 = 1,249$ Ом/км:

$$X_{кл4} = x_0 \cdot l = 0,07 \cdot 0,055 = 0,385 \text{ мОм}, \quad (123)$$

$$r_{кл4} = r_0 \cdot l = 1,249 \cdot 0,055 = 0,068 \text{ мОм}, \quad (124)$$

$$r_{\Sigma} = r_{\Sigma4} + r_{кл4} + r_{a2} + r_k = 17,707 \text{ мОм}, \quad (125)$$

$$x_{\Sigma} = x_{\Sigma4} + x_{a3} + x_{кл4} = 9,7 + 0,385 + 0,07 = 10,785 \text{ мОм}, \quad (126)$$

$$z_{\Sigma} = \sqrt{x_{\Sigma}^2 + r_{\Sigma}^2} = \sqrt{10,785^2 + 17,707^2} = 19,95 \text{ мОм}. \quad (127)$$

Произведём расчёт К3⁽³⁾:

$$I_{K5}^{(3)} = \frac{U_c}{\sqrt{3} \cdot z_{\Sigma}} = \frac{0,4 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 19,95} = 11,56 \text{ кА}, \quad (128)$$

$$T_{a5} = \frac{x_{\Sigma}}{z_{\Sigma} \cdot \omega} = \frac{10,785}{19,95 \cdot 314} = 0,0014, \quad (129)$$

$$K_{yд5} = 1 + e^{-0,01/Ta5} = 1 + e^{-0,01/0,0014} = 1,0079, \quad (130)$$

$$I_{yд5} = \sqrt{2} \cdot K_{yд4} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{*K35}^{(3)} = 1,41 \cdot 1,0079 \cdot 11,7 = 16,68 \text{ кА}. \quad (131)$$

Схема замещения с указанием точек расчётов коротких замыканий представлена на рисунке 8.

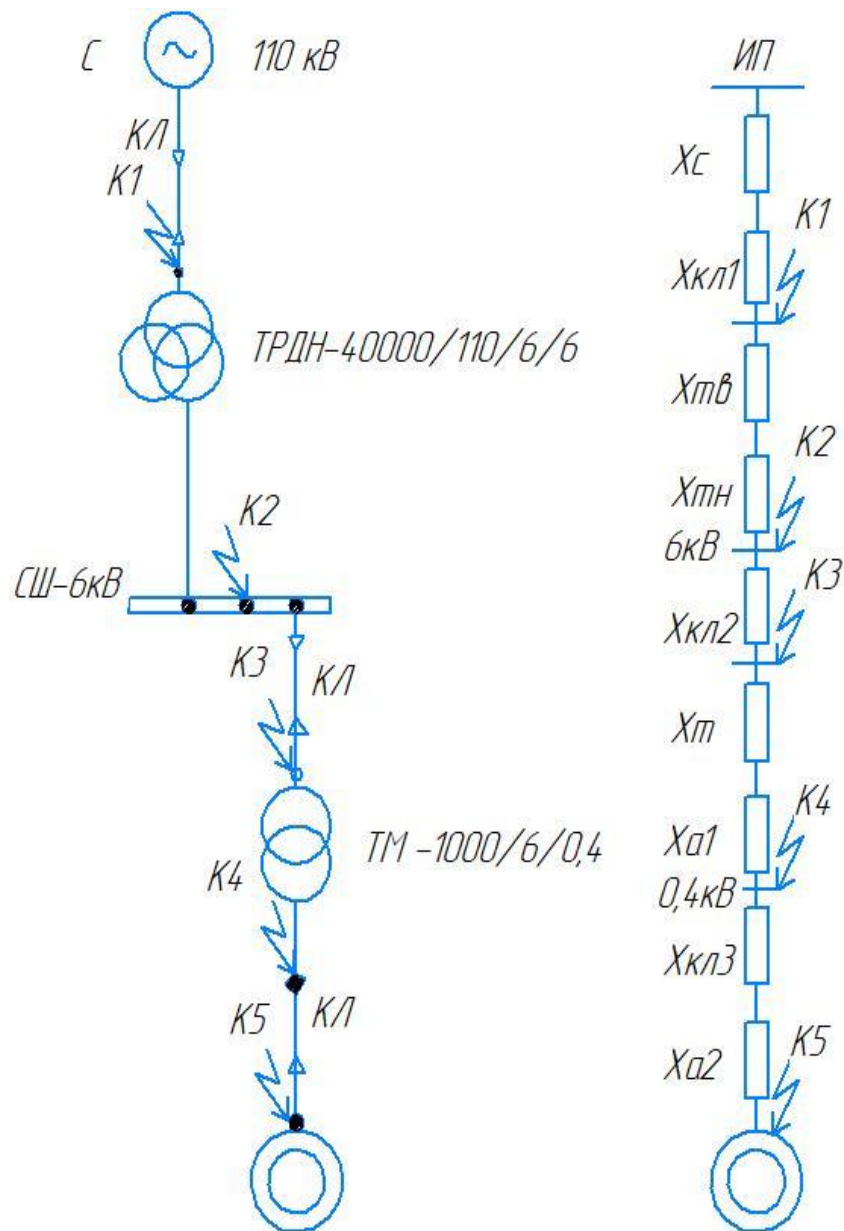


Рисунок 8 – Приведённая схема замещения

Вывод: произвели расчеты токов КЗ, ударных токов КЗ. а также симметричных токов КЗ на стороне 110 кВ, 6 кВ, 0,4кВ. Составили схему замещения для кабельных линий.

9 Выбор и проверка электрооборудования производства

9.1 Расчет электрооборудования на стороне 110 кВ

Произведём подбор выключателя фирмы «ЭТК Оник» [17]:

Проверим по работоспособности $U_{НОМ}$:

$$U_{уст} \leq U_{НОМ}, \quad (132)$$

$$110 = 110 \text{ кВ.}$$

Проверим по работоспособности $I_{НОМ}$:

$$I_p \leq I_{доп}, \quad (133)$$

$$I_{макс} \leq I_{НОМ}, \quad (134)$$

$$I_p = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{40000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 201,06 \text{ А}, \quad (135)$$

$$I_{макс} = 1,4 \cdot \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_H} = 1,4 \cdot \frac{40000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 281,47 \text{ А}, \quad (136)$$

$$I_p = 201,06 \leq I_{НОМ} = 2 \text{ кА}, \quad (137)$$

$$I_{макс} = 281,47 \leq I_{НОМ} = 2 \text{ кА}. \quad (138)$$

Проверим по работоспособности отключения симметричного тока:

$$I_{n,t} \leq I_{откл.н}, \quad (139)$$

$$I_{n,t} = I_{НО} = 8,639 \text{ кА}, \quad (140)$$

$$I_{n,t} = 8,639 \text{ кА} \leq I_{откл.н} = 40 \text{ кА}. \quad (141)$$

Проверим по работоспособности отключения $I_{a,t}$:

$$i_{a,t} \leq I_{a,НОМ} = \sqrt{2} \cdot \beta / 100 \cdot I_{откл.н}, \quad (142)$$

$$\tau = \tau_{рз} + \tau_{св} = 0,014 + 0,047 = 0,061 \text{ с}, \quad (143)$$

$$i_{a,t} = \sqrt{2} \cdot I_{HO} \cdot e^{-\tau/Ta} = \sqrt{2} \cdot 8,639 \cdot e^{-0,047/0,05} = 1,91 \text{ кА.} \quad (144)$$

$Ta=0,05$ - «величина постоянной времени затухания апериодической составляющей» [11];

$$i_{a,НОМ} = \left(\sqrt{2} \cdot \frac{\beta_{НОИ}}{100} \right) \cdot I_{H,\tau} = 1,41 \cdot \frac{44}{100} \cdot 40 = 25,5 \text{ кА,} \quad (145)$$

$$i_{a,t} = 1,91 \leq I_{a,НОМ} = 25,5 \text{ кА.} \quad (146)$$

Проверим по работоспособности включения:

$$I_{HO} \leq I_{ВКЛ.Н}, \quad (147)$$

$$I_{уд} \leq I_{ВКЛ.Н}, \quad (148)$$

$$I_{HO} = 8,6 \leq I_{ВКЛ.Н} = 40 \text{ кА,} \quad (149)$$

$$I_{уд} = 21,2 \leq I_{В.НОМ} = 95 \text{ кА.} \quad (150)$$

Проверим по работоспособности соблюдения электродинамической стойкости предельно сквозным током:

$$I_{по} \leq I_{прс}, \quad (151)$$

$$I_{уд} \leq I_{д} = I_{прс}, \quad (152)$$

$$I_{HO} = 8,6 \leq I_{прс} = 40 \text{ кА.} \quad (153)$$

$$I_{уд} = 21,2 \leq I_{В.НОМ} = 95 \text{ кА.} \quad (154)$$

Проверим по работоспособности соблюдения термостойкости:

$$T_{откл} = T_{раз} + T_{пвоткл} = 0,014 + 0,057 = 0,71с, \quad (155)$$

$$B_k = I_{HO}^2 (T_{откл} + Ta) = 8,6 \cdot 10^6 A^2с. \quad (156)$$

Принимая во внимание $T_{откл} = 0,15с < t_c = 2,9с$ уравнение примет

следующий вид:

$$W_k = 8,6 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \text{ c} \leq I_T^2 T_{\text{откл}} = 40 \cdot 10^3 \cdot 0,71 = 2,8 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \text{ c}. \quad (157)$$

Полностью всем требованиям удовлетворяет «ВЭКТ 110-40/2000 - эле газовой высоковольтный выключатель, в качестве дугогасящей и изолирующей среды использована смесь эле газа и тетра фтор метана (SF6+CF4)». [26]

Произведём расчёты для подбора разъединителя:

Проверим по работоспособности $U_{\text{НОМ}}$:

$$U_{\text{уст}} \leq U_{\text{НОМ}}, \quad (158)$$
$$110 = 110 \text{ кВ}.$$

Проверим по работоспособности $I_{\text{НОМ}}$:

$$I_p \leq I_{\text{НОМ}}, \quad (159)$$

$$I_p = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{40000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 201,06 \text{ А}, \quad (160)$$

$$I_p = 201,06 \leq I_{\text{НОМ}} = 1 \text{ кА}. \quad (161)$$

Проверим по работоспособности соблюдения электродинамической стойкости предельно сквозным током:

$$I_{\text{уд}} \leq I_d = I_{\text{прс}}, \quad (162)$$

$$I_{\text{уд}} = 20,10 \text{ кА} \leq I_{\text{прс}} = 80,0 \text{ кА}. \quad (163)$$

Проверим по работоспособности соблюдения термостойкости:

$$W_k = I_{\text{НО}}^2 (T_{\text{откл}} + T_a) = 8,89 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \text{ c}, \quad (164)$$

$$B_k = 8,89 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \text{ c} \leq I_T^2 T_{\text{откл}} = 2,2 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \text{ c}. \quad (165)$$

Характеристики РДЗ-110/1000НУХЛ1 удовлетворяют требованиям установки высоковольтного разъединителя.

Произведём расчёты для подбора трансформатора тока:

Проверим по работоспособности $U_{\text{НОМ}}$:

$$U_{\text{уст}} \leq U_{\text{доп}}, \quad (166)$$

$$110 = 110 \text{ кВ}.$$

Проверим по работоспособности $I_{\text{НОМ}}$:

$$I_p \leq I_{\text{НОМ}}, \quad (167)$$

$$I_p = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{40000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 201,06 \text{ А}, \quad (168)$$

$$I_{\text{НОМ}} = 300 \text{ А},$$

$$I_p = 201,06 \leq I_{\text{НОМ}} = 300 \text{ А}.$$

Проверим по работоспособности соблюдения электродинамической стойкости:

$$I_{\text{уд}} \leq I_{\text{вд}}, \quad (169)$$

$$I_{\text{уд}} = 20,10 \text{ кА},$$

$$I_{\text{вд}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{пт}} \cdot k_{\text{динам}} = 1,41 \cdot 300 \cdot 50 = 21,2 \text{ кА}, \quad (170)$$

$$I_{\text{уд}} = 20,10 \text{ кА} \leq I_{\text{вд}} = 21,2 \text{ кА}.$$

Проверим по работоспособности соблюдения термостойкости, принимая во внимание по справочным данным $K_m = 25$:

$$B_k = I_n^2 \cdot t = 8,639^2 \cdot (0,5 + 0,05) = 41,04 \text{ кА}^2 \text{ c}, \quad (171)$$

$$I_{\text{терм}} = K_m^2 \cdot I_{\text{НОМ}}^2 \cdot t_m = 25,0^2 \cdot 0,3^2 \cdot 3 = 168,75 \text{ кА}^2\text{с}, \quad (172)$$

$$41,04 \text{ кА}^2\text{с} \leq 168,75 \text{ кА}^2\text{с}.$$

Проверим трансформатор по вторичной нагрузке, которая включает в себя амперметр и систему - релейная защита 10 кВ:

$$r_{np} = \frac{S_{np}}{I_2^2} = \frac{0,11}{25} = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}, \quad (173)$$

$$r_{np} = r_{2\text{НОМ}} - r_{np} - r_k = 1,60 - 4,4 \cdot 10^{-3} - 0,11 = 1,4856 \text{ Ом}. \quad (174)$$

Произведём расчёт сечения проводника вторичных цепей, при длине провода 150 м:

$$S = \frac{\rho \cdot L}{r_{np}} = \frac{17,5 \cdot 10^{-3} \cdot 150}{1,4856} = 1,75 \text{ мм}^2. \quad (175)$$

К установке используем «ТВТ110 – I – 300/5 с медным проводом 2,5 мм² для вторичных цепей» [7]

9.2 Расчет электрооборудования на стороне 6 кВ

Произведём подбор выключателя:

Проверим по работоспособности $U_{\text{НОМ}}$:

$$U_{\text{уст}} \leq U_{\text{НОМ}}, \quad (176)$$

$$6 \leq 10 \text{ кВ}.$$

Проверим по работоспособности $I_{\text{НОМ}}$:

$$I_p \leq I_{\text{НОМ}}, \quad (177)$$

$$I_p = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot U_H} = \frac{40000}{1,73 \cdot 2 \cdot 6,3} = 1,8 \text{ кА}, \quad (178)$$

$$I_{\text{НОМ}} = 3 \text{ кА},$$

$$I_p = 1,8\text{к} \leq I_{\text{НОМ}} = 3 \text{кА}.$$

Проведём измерения способов срабатывания выключателей на конкретные аварийные режимы работы:

1: симметричный I_{nt} :

$$I_{nt} \leq I_{OT.\text{НОМ}}, \quad (179)$$

$$I_{nt} = 17 \text{кА} \leq I_{OT.\text{НОМ}} = 20\text{кА}.$$

2: на $i_{a.\tau}$ КЗ, принимая во внимание $t_{\text{реле.з}} = 0,01\text{с}$, $t_{\text{ср.выкл}} = 0,03$, $\beta_{\text{НОМ}} = 0,04\text{с}$:

$$I_{a,tн} = \sqrt{2} \cdot \beta_{\text{НОМ}} \cdot I_{OT.\text{НОМ}} = 1,41 \cdot 0,04 \cdot 20 = 11,3\text{кА}, \quad (180)$$

$$I_{a,tр} = \sqrt{2} \cdot \beta_{\text{НОМ}} \cdot I_{OT.p} = 1,41 \cdot 0,04 \cdot 17 = 9,52\text{кА}, \quad (181)$$

$$9,52\text{кА} \leq 11,3\text{кА}.$$

Проверим по работоспособности соблюдения электродинамической стойкости тока КЗ:

$$I_{уд} \leq I_{пр.с}, \quad (182)$$

$$I_{уд} = 55,1 \text{кА} \leq I_{пр.с} = 80\text{кА}.$$

Произведём проверку по тепловой защите:

$$W_k = I_n^2 \cdot t = 17^2 \cdot (0,050 + 0,120) = 49,13\text{кА}^2\text{с}, \quad (183)$$

$$W_{кт} = I_{тер}^2 \cdot t_m = 31,5^2 \cdot 3 = 2967\text{кА}^2\text{с}, \quad (184)$$

$$2967\text{кА}^2\text{с} \leq 3150\text{кА}^2\text{с}.$$

Согласно полученным результатам проверки на стойкость, выбираем выключатели: вводной - ВБЭ-10-31,5/3150 УХЛ2; линейные - ВБЭ-10-

31,5/1000 УХЛ, ВБЭ-10-31,5/1600 УХЛ, ВБЭ-10-31,5/630 УХЛ; секционный ВБЭ-10-31,5/3150 УХЛ2.

Произведём подбор трансформатора тока 6 кВ по следующим расчётным параметрам:

$$U_{уст} \leq U_{НОМ}, \quad (185)$$

$$6 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ}.$$

Проверим по работоспособности $I_{НОМ}$:

$$I_p \leq I_{НОМ}, \quad (186)$$

$$I_p = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot U_H} = \frac{40000}{1,73 \cdot 2 \cdot 6,3} = 1,8 \text{ кА}, \quad (187)$$

$$I_{НОМ} = 2 \text{ кА},$$

$$I_p = 1,8 \text{ кА} \leq I_{НОМ} = 2 \text{ кА}.$$

Проверим по работоспособности соблюдения электродинамической стойкости:

$$I_{уд} \leq I_{вд}, \quad (188)$$

$$I_{уд} = 55,10 \text{ кА},$$

$$I_{вд} = \sqrt{2} \cdot I_{НОМ} \cdot k_{динам} = 1,41 \cdot 2 \text{ кА} \cdot 22 = 62,04 \text{ кА}, \quad (189)$$

$$I_{уд} = 55,10 \text{ кА} \leq I_{вд} = 62,04 \text{ кА}.$$

Произведём проверку по тепловой защите:

$$B_k = I_n^2 \cdot t = 17^2 \cdot (0,050 + 0,120) = 49,13 \text{ кА}^2 \text{ с}, \quad (190)$$

$$B_{кт} = I_{тер}^2 \cdot K_{1НОМ}^2 \cdot t_m = 31,5^2 \cdot 4 \cdot 3 = 11907 \text{ кА}^2 \text{ с}, \quad (191)$$

$$49,13 \text{ кА}^2 \text{ с} \leq 11907 \text{ кА}^2 \text{ с}.$$

Под полученные результаты подходит ТШЛ-20. Для подключения измерительных приборов идеальным решением станет установка измерительного трансформатора НТМИ-6кВ с максимальным напряжением вторичной обмотки 100 В, классом точности 0,5.

Произведём расчёт линии электропередачи для подключения каждой подстанции на примере П/ст №1. На П/ст №1 расположены 2хТМЗ 1000 кВА.

$$U_{уст} \leq U_{НОМ}, \quad (192)$$

$$6 \text{ кВ} = 6 \text{ кВ},$$

$$I_p = \frac{S_б}{\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 91,75 \text{ А}, \quad (193)$$

$$S_{\text{Э}} = \frac{I_p}{j_{\text{Эк}}} = \frac{91,75}{1,4} = 65,5 \text{ мм}^2. \quad (194)$$

Для питания каждого трансформатора ТМЗ 1000 кВА по справочным данным выбираем сечение 3х70мм² длительно допустимый ток составляет 160 А, принимая во внимание коэффициент для типа прокладки кабеля рядом с работающими.

$$I_p \leq I_{\text{доп}}, \quad (195)$$

$$91,75 \leq I_{\text{доп}} = k \cdot I_{\text{доп}} = 160 \cdot 0,920 = 147,2 \text{ А}.$$

Произведём проверку выбранного кабеля на термостойкость:

$$S_{\text{мин}} \geq s = \frac{\sqrt{B_k}}{C}, \quad (196)$$

$$B_k = I_{\text{НО}}^2 (T_{\text{откл}} + T_a) = (14)^2 \cdot (0,04 + 0,4) = 86,24 \text{ А}^2 \text{ с}, \quad (197)$$

$$70 \geq s = \frac{\sqrt{86,24 \cdot 10^6}}{147,2} = 63,2 \text{ мм}^2.$$

Выбранное ранее сечение удовлетворяет условиям, следовательно,

выбираем кабель АВБбШв 3х70.

Комплектуем П/СТ ячейками КРУ по следующим техническим характеристикам: $U_{ном} = 6\text{кВ}$, на частоту тока 50Гц, наибольшее $U_{лин} = 7,3\text{кВ}$; $I_{мин}$ для ячеек КРУ 3,15 кА; $I_{ном}$ выключателя КРУ 31,5 кА; электродинамическая стойкость 70кА; с нормальным типом изоляции по ГОСТ 1516.1 – 76.

Произведём подбор ТСН для ГПП. $K_{загр} = 0,65$ $K_{одн} = 0,8$

Произведём расчёт потребляемой мощности и представим в таблицу 6:

$$S = \sum P K_{загр} \cdot K_{одн} = 338,4 \cdot 0,65 \cdot 0,8 = 176 \text{ кВА.} \quad (198)$$

Таблица 6 – Электроприёмники ГПП для ТСН

Название электроприёмника для ТСН	Мощность электроприёмника для ТСН, кВт
Электропривод для охлаждения 2хТРДН 40000	2х34,6
Электрообогрев КРУ	50х2
Освещение, вентиляция ЗРУ 6 кВ	20
Система охлаждения КРУ	4х20
Всего:	338,4

Для собственных нужд подстанции, согласно расчётным данным, подходят трансформаторы типа: 2хТМ 180/6/0,4 У/УН-0.

9.3 Расчет электрооборудования на стороне 0,4 кВ

Произведём расчёты для подбора автоматического выключателя по току и напряжению:

$$U_{уст} \leq U_{ном}, \quad (199)$$

$$0,4 \text{ кВ} = 0,4\text{кВ},$$

$$I_p \leq I_{ном}, \quad (200)$$

$$I_p = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 1445 \text{ А},$$

$$I_p = 1445\text{A} \leq I_{\text{НОМ}} = 1600\text{A}.$$

Для установки идеально подходит «ВА 55-43-344730-1600А.» [11]

Произведём подбор кабельной продукции напряжением 0,4кВ:

Для примера возьмём наиболее важные электроприёмники. На П/СТ №1 это 3 асинхронных электродвигателя мощностью 110 кВт, $\cos \varphi = 0,91$.

$$U_{\text{уст}} \leq U_{\text{НОМ}}, \quad (201)$$

$$0,4 \text{ кВ} = 0,4\text{кВ},$$

$$I_p = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos \varphi} = \frac{110}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 0,91} = 175 \text{ A}.$$

Согласно справочным данным выбираем кабель с запасом на взрывобезопасность и пожаробезопасность, ВВГ (3×95+1×35).

Вывод: произвели подбор и проверку оборудования на стороне 110кВ, 6кВ и 0,4кВ.

10 Расчет молниезащиты ГПП

Особо важную роль играет защита главной понизительной подстанции от природных явлений, таких как разряды молний. Прямое воздействие молний может очень сильно повредить особо важное электрооборудование, тем самым повлечь за собой цепочку аварий и техногенных катастроф [14].

ГПП для защиты оборудуется молниеотводом. По справочным данным, подберём рекомендуемый уровень надёжности молниезащиты $-0,99$, и $h=100$ м. Так как молниеотвод рекомендуется двух стержневой.

Высота стержней определяется по:

$$h_c = \frac{L_{\max} - L}{L_{\max} - L_c} h_0 = \frac{300 - 250}{300 - 100} \cdot 100 = 25 \text{ м.} \quad (202)$$

Произведём расчёт полуширины r_x , для габаритных размеров:

$$r_x = \frac{r_0 \cdot (h_0 - h_x)}{h_0} = \frac{110 \cdot (120 - 50)}{120} = 64 \text{ м.} \quad (203)$$

Произведём расчёт длины и сечения:

$$r_x = \frac{r_0 \cdot (h_c - h_x)}{h_c} = \frac{110 \cdot (60 - 50)}{60} = 20 \text{ м.} \quad (204)$$

Вывод: произвели подбор молниезащиты с двойными стержневыми молниеотводами высотой 25м.

Заключение

В выпускной квалификационной работе разработана современная и высокоэффективная система электроснабжения производства «Капролактама» предприятия ПАО «КуйбышевАзот».

На первом этапе выполнения работы был произведен сбор необходимой информации и комплексный анализ всех потребителей производства. По полученным данным рассчитали максимально ожидаемы нагрузки с учетом нагрузки освещения, которые составили следующие значения: $P_p=8,977$ МВт, $Q_p=7,205$ МВАр, $S_p=12,069$ МВА.

Светотехнический расчет освещения производственных цехов, выполненный в программе «DIALux 4.13 Light», позволил выбрать и принять к установки взрывозащищённые светильники типа ДСП02-ГЗС-50. Для повышения энергоэффективности и реализации политики энергосбережения на предприятии разработан комплекс рекомендаций, позволяющих оптимизировать силовые нагрузки от освещения. К ним относятся: использование датчиков движения, датчиков освещения, датчиков дыма, диммирование светильников.

Важным этапом выполнения работы стал выбор силовых трансформаторов для ГПП. Произвели расчёты и подбор оборудования для главной понизительной подстанции, привели стоимость затрат на содержание одного из установленных на ГПП трансформаторов 110/6кВ, а также его проверку на перегрузку в аварийных ситуациях. К установке в КТП были выбраны следующие типы силовых трансформаторов: ТМЗ 2х1000 кВА, ТМЗ 2х6000 кВА.

Все объекты производства «Капролактама» были оборудованы собственными трансформаторными подстанциями, защитным оборудованием, трансформаторами собственных нужд. Всё оборудование соответствует нагрузкам и требованиям эксплуатации на предприятии.

Расчет токов КЗ на сторонах 110кВ, 6кВ, 0,4кВ позволил произвести выбор и проверку электрооборудования для проектируемой системы электроснабжения производства «Капролактама».

Безопасность от стихийных повреждений на главной понизительной подстанции обеспечивает молниезащита двойного стержневого типа.

В ВКР была представлена и спроектирована система электроснабжения производства «Капролактама» для ПАО «КуйбышевАзот», которая обеспечивает качественное непрерывное электроснабжение крупного химического объекта, отвечающая требованиям надежности, безопасности и экологичности в соответствии с действующими стандартами и нормами проектирования.

Список используемых источников

1. Вахнина В.В., Горячева В.Л., Степкина Ю.В. Проектирование систем электроснабжения машиностроительных предприятий: Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования. – Тольятти: ТГУ, 2004. - 92 с.
2. Вахнина В.В., Черненко А.Н. Проектирование систем электроснабжения // Электронное учебное пособие. Тольятти: ТГУ, 2016. URL: <https://dspace.tltsu.ru/handle/123456789/2976> (дата обращения: 20.01.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
3. Вахнина В.В., Черненко А.Н. Системы электроснабжения // Электронное учебное пособие. Тольятти: ТГУ, 2015. URL: <https://dspace.tltsu.ru/handle/123456789/2943> (дата обращения: 20.01.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
4. Вахнина В.В., Черненко А.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов: Учебно – методическое пособие для практических занятий и курсового проектирования – Тольятти: ТГУ, 2007. - 54 с.
5. Киреева Э.А., Шерстнев С.Н., под общим ред. Шерстнева С.Н. Полный справочник по электрооборудованию и электротехнике (с примерами расчетов). - Москва, 2013. - 864с.
6. Ковалев И.Н. Электроэнергетические системы и сети : учебник. М. : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2015. 363 с.
7. Крючков И.П. Переходные процессы в электроэнергетических системах. Учебное пособие. - Москва, МЭИ, 2009. - 414 с.
8. Кудрин Б.И. Электроснабжение: учебник. М.: Феникс, 2018. - 382 с.
9. Кузнецов С.М. Проектирование тяговых и трансформаторных подстанций: учебное пособие. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2013. - 92 с.
10. ОАО «Завод Электроконтактор» [электронный ресурс], URL: <https://www.ekzavod.ru/catalog/vyklyuchатели-ва/vyklyuchatel-va-5545-2500a-s->

[mrt-2-s-ep](#), Автоматический выключатель ВА 55-45, (дата обращения: 15.03.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

11. ОАО «Самарский завод Электрощит» [электронный ресурс], URL: <https://electroshield.nt-rt.ru/images/manuals/tol10m.pdf>, Трансформатор тока ТОЛ-СЭЩ-10-0,2S-600/5 (дата обращения: 15.03.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

12. ОАО «Самарский завод Электрощит» [электронный ресурс], URL: <https://www.electroshield.ru/catalog/vakuumnie-vykluchateli/vvu-seshch-10-kv/>, Выключатель вакуумный серии ВВУ-СЭЩ-П-10-20/1000 (дата обращения: 15.03.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

13. ОАО «Самарский завод Электрощит» [электронный ресурс], URL: https://www.electroshield.ru/upload/iblock/1c5/ORT.135.006-TI-_-NALI_SESHCH_6_10_-TEKHNICHESKAYA-INFORMATSIYA.pdf, Трансформатор напряжения НАЛИ-СЭЩ-10-1-0,5-225 (дата обращения: 15.03.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

14. Ополева, Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов учеб. пособие / Г.Н. Ополева. – М.: Форум; ИНФРА-М, 2018. – 416 с.

15. Правила устройства электроустановок в вопросах и ответах. Раздел 4. Распределительные устройства и подстанции. [Электронный ресурс] URL: <http://etp-perm.ru/el/pue> (дата обращения: 1.02.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

16. Сазонова Т.В., Шлейников В.Б. Электроснабжение силовых электроприемников цеха промышленного предприятия: учебное пособие. М.: Бибком, 2016. 110 с.

17. Справочник инженера по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электрических станций и сетей. Централизованное и автономное электроснабжение объектов, цехов, промыслов, предприятий и промышленных комплексов [Электронный ресурс] : учеб. пособие. Вологда : "Инфра-Инженерия", 2016. 928 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/95768>, (дата обращения: 07.03.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

18. Шеховцов В.П. Расчет и проектирование схем электроснабжения
Методическое пособие для курсового проектирования // Электронное учебное
пособие. Москва: ФОРУМ-ИНФРА-М, 2005.
URL: <https://cloud.mail.ru/stock/dgAkQmzwN5HVgtLiYS5Qz459> (дата
обращения: 20.04.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
18. Front Matter. Electrical Systems and Equipment. Incorporating Modern
Power System Practice, 3rd edition. 1992. – 1018 с.
19. Ismail Kasikci. Short Circuits in Power Systems: A Practical Guide to IEC
60909, Second edition. 2017. – 298 с.
20. LJ Myatt. Symmetrical Components. Elsevier Ltd, 1968. – 184 с.
21. M. Laughton, D. Warne. Electrical Engineer's Reference Book. Sixteenth
edition. 2003. – 396 с.
22. Philip Kiameh. Power Plant Electrical Equipment and Systems Handbook.
Second edition. 2013. – 583 с.