

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 Проектирование системы электроснабжения завода по производству холодильного оборудования ООО «Термосистемы-С»

Обучающийся

М.С. Албатырев

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., И.В. Горохов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2023

## Аннотация

Темой ВКР является «Проектирование системы электроснабжения завода по производству холодильного оборудования ООО «Термосистемы-С».

Исходные данные ВКР:

- информация о группах электроприемников и технологического оборудования отдельных цехов предприятия, а также план их размещения;
- генеральный план предприятия.

На начальном этапе рассчитаны электрические нагрузки электроприемников наиболее мощного цеха, а также нагрузки всех цехов по заводу в целом.

На этапе расчета нагрузок определены требуемые к установке компенсирующие устройства.

Так как нагрузка по предприятию распределяется неравномерно, то в соответствии с этим была построена картограмма электрических нагрузок. Данная операция позволила определить место установки электрогенераторной завода по производству холодильного оборудования.

Заключительными этапами работы являются расчет токов КЗ на сторонах ВН и НН, выбор оборудования и релейной защиты для стабильной работы системы электроснабжения предприятия.

## Содержание

Введение.....	4
1 Расчет электрических нагрузок .....	5
2 Расчет электрического освещения.....	13
3 Расчет компенсирующих устройств.....	17
4 Построение картограммы электрических нагрузок.....	19
5 Расчет потерь напряжения кабельных линий .....	22
6 Анализ схемы электроснабжения.....	27
7 Расчет токов КЗ .....	29
8 Выбор и проверка оборудования.....	34
9 Расчет релейной защиты и автоматики.....	38
Заключение .....	42
Список используемых источников.....	43

## Введение

Сегодня сфера производства холодильного оборудования и агрегатов активно развивается. Холодильное оборудование является наиболее энергоемким оборудованием для любого типа зданий, так как часть энергии выбрасывается в атмосферу при генерации холода. В соответствии с этим изготовление холодильного оборудования определяет в значительной степени энергоэффективность предприятия, на котором оно используется. Установки холодоснабжения используются в общественных, жилых и административных зданиях (особенно для работы систем кондиционирования), а также на промышленных предприятиях и производствах для поддержания требуемых температурных параметров технологических процессов при изготовлении различных видов и типов продукции.

Надежность спроектированной системы электроснабжения предприятия по производству холодильного оборудования определяет уровень безопасной работы службы эксплуатации завода.

Объект исследования занимается производством промышленных холодильных установок и агрегатов, а также холодильного оборудования общего исполнения для общественных, жилых и административных зданий. Завод изготавливает как комплектующие для холодильных установок (компрессоры, испарители, конденсаторы), так и блочные холодильные системы и агрегаты в сборе: генераторы ледяной воды, холодильные и морозильные камеры, чиллеры.

Целью ВКР является проектирование системы электроснабжения завода по производству холодильного оборудования.

Задачи ВКР заключаются в расчете электрических нагрузок, выборе электрооборудования на основании расчета токов КЗ, в расстановке этого оборудования на территории предприятия по картограмме электрических нагрузок, в проектировании релейной защиты для исключения аварийных режимов работы электроустановок.

## 1 Расчет электрических нагрузок

Используя метод упорядоченных диаграмм, вычислим нагрузки завода, который осуществляет производство холодильного оборудования [1]. Расчет электрических нагрузок проведем на примере цеха по производству генераторов ледяной воды, холодильных и морозильных камер. Электроприемники (ЭП) представлены в таблице 1.

Для каждой установки, представленной в таблице 1, используется не более пяти электроприемников для применения отдельной технологической операции.

Расчет проводится в следующем порядке:

– «Нагрузка группы ЭП за наиболее загруженную смену:

$$P_{\text{см}} = K_{\text{и}} \cdot P_{\text{у}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{см}} = P_{\text{см}} \cdot \text{tg}\varphi \quad (2)$$

$$S_{\text{см}} = \sqrt{P_{\text{см}}^2 + Q_{\text{см}}^2} \quad (3)$$

где  $P_{\text{у}}$  – суммарная установленная активная мощность всех приёмников цеха, принимаемая по исходным данным, кВт;

$K_{\text{и}}$  – коэффициент использования;

$\text{tg}\varphi$  – характерное для приёмников данного цеха средневзвешенного значения коэффициента реактивной мощности» [13].

– Суммарная установленная активная мощность ЭП:

$$P_{\text{у}} = \sum_{i=1}^n P_i \quad (4)$$

– Эффективное число электроприемников:

$$n_{\text{э}} = \frac{(\sum_{i=1}^m n_i P_{\text{Hi}})^2}{\sum n_i P_{\text{Hi}}^2} \quad (5)$$

– Групповой коэффициент использования:

$$K_{\text{и}} = \frac{\sum_1^m P_{\text{см}}}{\sum_1^m P_{\text{уст}}} \quad (6)$$

«При получении эффективного числа электроприемников менее 10, значение  $K_{\text{р}}$  ' принимаем равным 1,1, иначе – принимаем равным 1» [13].

– «Расчетные нагрузки:

$$P_{\text{р}} = K_{\text{р}} \cdot P_{\text{см}} \quad (7)$$

$$Q_{\text{р}} = K'_{\text{р}} \cdot P_{\text{см}} \quad (8)$$

$$S_{\text{р}} = \sqrt{P_{\text{р}}^2 + Q_{\text{р}}^2} \quad (9)$$

где  $K_{\text{р}}$  – коэффициент расчетный» [13].

– Максимальный расчетный ток:

$$I_{\text{р}} = \frac{S_{\text{р}}}{\sqrt{3}U_{\text{н}}} \quad (10)$$

По вышеприведенным формулам проведем расчет нагрузок на примере производства промышленных холодильных установок и агрегатов. Результаты расчета нагрузок данного производства занесем в таблицу 2.

Данные расчетные формулы применим также для расчета других производств предприятия. Итоговый расчет по заводу представим в таблице 3.

Таблица 1 – Данные электроприемников цеха по производству промышленных холодильных установок и агрегатов и холодильного оборудования общего исполнения

Шифр	Наименование установки по производству оборудования	n	P <sub>н</sub> , кВт					K <sub>н</sub>	cosφ
1.1-1.5	Установка компрессорного оборудования и агрегатов	5	29	58	72	23	20	0,78	0,78
1.6	Установка запорно-регулирующей арматуры	1	–	–	29	–	–	0,52	0,73
1.7-1.11	Установка испарителей и вентиляторов	5	18	12	10	8	9	0,51	0,72
1.12,1.13	Установка конденсаторов и вентиляторов	2	–	–	–	28	12	0,68	0,77
1.14-1.16	Электроприводы приточной и вытяжной вентиляции	3	50	–	35	–	33	0,67	0,73
1.17	Установка производства кранов шаровых	1	–	–	–	–	12	0,62	0,77
1.18-1.21	Установка клапанов и КИП	4	1,2	–	1,3	1,2	1,8	0,83	0,84
2.22,2.23	Оборудование производства трехходовых клапанов	2	–	–	10	–	27	0,72	0,73
2.24,2.25	Оборудование производства заслонок дроссельного типа с электроприводом или ручным управлением	2	–	–	19	–	40	0,53	0,79
2.26-2.28	Установка ресиверов	3	47	–	–	30	–	0,61	0,77
2.29,2.30	Установка теплообменного оборудования и радиаторов	2	32	–	–	14	–	0,81	0,83
2.31,2.32	Установка фильтров-осушителей и воздушных фильтров	4	–	–	–	7	18	0,82	0,87
2.33	Установка автоматики	1	–	–	–	–	3,5	0,91	0,97
3.34-3.36	Аппарат точечной, контактной и дуговой сварки	3	–	–	17	8	37	0,62	0,74
3.37,3.38	Разрезной станок	2	12	–	–	–	47	0,83	0,82
3.39-3.41	Шлифовальный станок	3	15	–	–	8	30	0,78	0,78
3.42,3.43	Токарный станок	2	–	–	–	4,5	22	0,79	0,87
3.44	Фрезерный станок	1	–	–	–	4,5	–	0,79	0,83
3.45-3.49	Мастерская	5	3,2	1,5	1,7	1,1	4,3	0,54	0,91
4.50,4.51	Пневмоустановка	2	–	15	–	–	65	0,82	0,97
4.52,4.53	Сварочная установка	2	–	7	–	–	47	0,53	0,73
4.54,4.55	Мастерская	2	–	8	–	–	8,5	0,52	0,77
Всего по цеху		52	1,1-72 кВт					–	–

Таблица 2 – Расчет электрических нагрузок цеха по производству промышленных холодильных установок и агрегатов, а также холодильного оборудования

Шифр	Наименование технологического оборудования	$P_{\text{мин}}$	$P_{\text{макс}}$	$n$	$P_y$	$K_{\text{и}}$	$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$	$P_{\text{см}}$	$Q_{\text{см}}$	$S_{\text{см}}$
		кВт			кВт				кВт	квар	кВА
Участок 1. Производство генераторов ледяной воды, холодильных и морозильных камер		1,2	72	21	465,5	0,69	0,77	0,84	321,48	270,33	420,03
1.1-1.5	Установка компрессорного оборудования и агрегатов	20	72	5	202	0,78	0,78	0,8	157,56	126,05	202
1.6	Установка запорно-регулирующей арматуры	29	29	1	29	0,52	0,73	0,94	15,08	11,01	20,66
1.7-1.11	Установка испарителей и вентиляторов	8	18	5	56	0,51	0,72	0,96	28,56	27,42	39,67
1.12,1.13	Установка конденсаторов и вентиляторов	12	28	2	40	0,68	0,77	0,83	27,2	20,94	35,32
1.14-1.16	Электроприводы приточной и вытяжной вентиляции	33	50	3	121	0,67	0,73	0,94	81,07	76,21	111,05
1.17	Установка производства кранов шаровых	12	12	1	12	0,62	0,77	0,83	7,44	5,73	9,66
1.18-1.21	Установка клапанов и КИП	1,2	1,8	4	5,5	0,83	0,84	0,65	4,57	2,97	5,44



Продолжение таблицы 2

Шифр	Наименование технологического оборудования	$P_{\text{мин}}$	$P_{\text{макс}}$	$n$	$P_y$	$K_{\text{и}}$	$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$	$P_{\text{см}}$	$Q_{\text{см}}$	$S_{\text{см}}$
		кВт			кВт				кВт	квар	кВА
Участок 2. Производство промышленных чиллеров, агрегатов и централей		3,5	62	14	309,5	0,66	0,79	0,77	203,65	157,26	257,3
2.22,2.23	Оборудование производства трехходовых клапанов	10	27	2	37	0,72	0,73	0,94	26,64	25,04	36,49
2.24,2.25	Оборудование производства заслонок дроссельного типа с электроприводом или ручным управлением	19	40	2	59	0,53	0,79	0,78	31,27	24,39	39,58
2.26-2.28	Установка линейных и рециркуляционных ресиверов	30	62	3	139	0,61	0,77	0,83	84,79	70,38	110,12
2.29,2.30	Установка теплообменного оборудования и радиаторов	14	32	2	46	0,81	0,83	0,67	37,26	24,96	44,89
2.31,2.32	Установка фильтров-осушителей и воздушных фильтров	7	18	4	25	0,82	0,87	0,57	20,5	11,69	23,56
2.33	Установка автоматики	3,5	3,5	1	3,5	0,91	0,97	0,25	3,19	0,8	3,29
Участок 3. Производство трубопроводов		1,1	47	16	216,8	0,74	0,8	0,75	159,62	119,59	199,45
3.34-3.36	Аппарат точечной, контактной и дуговой сварки	8	37	3	62	0,62	0,74	0,91	38,44	34,98	51,95

Продолжение таблицы 2

Шифр	Наименование технологического оборудования	$P_{\text{мин}}$	$P_{\text{макс}}$	$n$	$P_y$	$K_{\text{и}}$	$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$	$P_{\text{см}}$	$Q_{\text{см}}$	$S_{\text{см}}$
		кВт			кВт				кВт	квар	кВА
3.37,3.38	Разрезной станок	12	47	2	59	0,83	0,82	0,7	48,97	34,28	59,72
3.39-3.41	Шлифовальный станок	8	30	3	53	0,78	0,78	0,8	41,34	33,07	53
3.42,3.43	Токарный станок	4,5	22	2	26,5	0,79	0,87	0,57	20,94	11,94	24,07
3.44	Фрезерный станок	4,5	4,5	1	4,5	0,79	0,83	0,67	3,56	2,39	4,29
3.45-3.49	Мастерская	1,1	4,3	5	11,8	0,54	0,91	0,46	6,37	2,93	7
Участок 4. Монтажный цех		7	65	6	150,5	0,68	0,9	0,49	102,8	50,42	114,5
4.50,4.51	Пневмоустановка и электроинструмент для сборки агрегатов	15	65	2	80	0,82	0,97	0,25	65,6	16,4	67,63
4.52,4.53	Сварочная установка	7	47	2	54	0,53	0,73	0,94	28,62	26,9	39,21
4.54,4.55	Мастерская	8	8,5	2	16,5	0,52	0,77	0,83	8,58	7,12	11,14
Итого		1,1	72	52	1142,3	0,69	0,8	0,76	787,55	597,6	988,62

Таблица 3 – Расчет электрических нагрузок завода

Наименование цеха	$P_y$	$K_{и}$	$\cos\varphi$	$tg\varphi$	$P_p$	$Q_p$	$S_p$	$I_p$
	кВт				кВт	квар	кВА	А
Производство промышленных холодильных установок и агрегатов, а также холодильного оборудования	1142,3	0,69	0,8	0,76	720,07	618,37	949,15	1369,98
Производство промышленных чиллеров, агрегатов и централей	475	0,68	0,74	0,91	323,00	293,93	436,72	630,35
Производство трубопроводной арматуры (запорной, предохранительной, регулирующей) для систем подачи хладоносителя	482	0,62	0,77	0,83	298,84	248,04	388,37	560,56
Производство оборудование систем подачи воздуха (заслонок дроссельных)	281	0,77	0,76	0,86	216,37	186,08	285,38	411,91
Помещение хранения, погрузки и сортировки готовой продукции	59	0,35	0,87	0,57	20,65	11,77	23,77	34,31
Административно-технический корпус и заводоуправление	86	0,72	0,83	0,67	61,92	41,49	74,53	107,57
Итого по цехам без учета освещения	2525,3	–	0,76	0,85	1640,85	1399,67	2156,73	3112,97

## Вывод по разделу 1

Крупнейшим потребителем завода является цех по производству промышленных холодильных установок и агрегатов, а также холодильного оборудования общего исполнения.

Рассматриваемый цех обладает самой большой мощностью (активной, реактивной и полной), а также имеет самое большое значение рабочего тока.

Цех по производству промышленных холодильных установок и агрегатов и холодильного оборудования общего исполнения имеет в своем составе четыре участка, самый мощный из которых – первый.

При рассмотрении в целом, то суммарная полная мощность силовых потребителей составляет 2156,73 кВА.

Далее необходимо провести расчет освещения производственных помещений.

## 2 Расчет электрического освещения

Расчет электроосвещения является важным вычислительным этапом при определении суммарной нагрузки, необходим для проектирования системы освещения предприятия. Расчет электрического освещения проводится независимо от оказываемого вида услуг и производимого типа продукции.

Учет нагрузки электрического освещения необходим для правильного выбора силового оборудования и трансформаторов.

Рассчитаем нагрузку освещения по методу удельной мощности с использованием паспортных данных светильников [6]. Каталожные данные необходимые для расчета освещения представлены на таблице 4.

«Средняя освещенность на рабочих местах с постоянным пребыванием людей должна быть не менее 200 лк, для складских помещений – 300 лк» [3],[14].

«Освещенность территории и дорог принимаем равной 10 лк» [9].

Соблюдая представленные требования нормативно-технической документации, проведем расчет числа светильников, а также затрачиваемой мощности на освещение внутри предприятия.

«Расчет электрической нагрузки освещения:

$$P_{po} = \frac{E \cdot K_c \cdot F}{\Phi/P} \quad (11)$$

$$Q_{po} = P_{po} \cdot \operatorname{tg}\varphi \quad (12)$$

где  $\Phi/P$  – световая отдача, Лм/Вт;

$F$  – площадь освещения, м<sup>2</sup>;

$K_c$  – коэффициент спроса» [3].

Необходимую полную мощность на освещение производственных помещений и прилегающих территорий вычислим по формуле 3.

Результаты проведенных расчетов по формулам представлены в таблице 5.

Таблица 4 – Паспортные данные светильников из каталогов АСТЗ

Рассматриваемый параметр	Единица измерения	Административно-технический корпус и заводоуправление	Заводские помещения	Наружное светодиодное освещение	Помещение хранения, погрузки и сортировки готовой продукции
Удельный световой поток	Лм/Вт	92,71	150,00	150,00	135,42
Модель светильника	–	ДПО12-30-043 Universal Soft EM3 MT 940	ЛСП68-2x80-011 Fregat	ДКУ62-40-001 Champion 730	ГСП17 со встроенным ПРА
Активная мощность	Вт	34	80	40	72
Световой поток	лм	3152	12000	6000	9750
Расчетное количество светодиодных светильников	шт	21	148	4	25
Цветовая температура	К	4000	4000	4000	4000
Степень пылевлагозащиты	–	IP20	IP65	IP66	IP65

Таблица 5 – Техничко-экономический расчет освещения

Наименование цеха	$F$	$K_c$	$\cos \varphi$	$\Phi/P$	$P_p$	$Q_p$	$S_p$	$E$
	$m^2$			Лм/Вт	кВт	квар	кВА	лк
Производство промышленных холодильных установок и агрегатов, а также холодильного оборудования общего исполнения	7922	0,88	0,96	150,00	9,30	2,69	9,68	200
Производство промышленных чиллеров, агрегатов и централей	902	0,88	0,96	150,00	1,06	0,29	1,10	200
Производство трубопроводной арматуры (запорной, предохранительной, регулирующей) для систем подачи хладоносителя	878	0,88	0,96	150,00	1,03	0,29	1,07	200
Производство оборудование систем подачи воздуха (заслонок дроссельных)	282	0,88	0,96	150,00	0,33	0,08	0,34	200
Помещение хранения, погрузки и сортировки готовой продукции	1512	0,62	0,97	135,42	2,08	0,50	2,14	300
Административно-технический корпус и заводоуправление	364	0,94	0,96	92,71	0,74	0,21	0,77	200
Прилегающие территории	4010	0,61	0,97	150,00	0,16	0,06	0,17	10
Итого	15870	–	0,96	–	14,70	4,12	15,27	–

Проведем расчет мощности завода с учетом освещения.

Результаты расчетов внесем в таблицу 6.

Таблица 6 – Электрическая нагрузка освещения

Нагрузка	$P_y$ , кВт	$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	$P_p$ , кВт	$Q_p$ , квар	$S_p$ , кВА	$I_p$ , А
Силовая	2525,30	0,76	0,85	1640,85	1399,67	2156,73	3112,97
Осветительная	14,46	0,96	0,29	14,70	4,12	15,27	22,04
Общая	2539,76	0,76	0,85	1655,55	1403,79	2170,59	3132,98

Вывод по разделу 2

Завод по производству холодильного оборудования требует нагрузки светодиодного освещения, которая составляет 15,27 кВА.



### 3 Расчет компенсирующих устройств

Расчет компенсирующих устройств является важным этапом при выполнении ВКР. Расчет компенсирующих устройств необходим для снижения суммарного значения реактивной мощности, полной мощности, а также рабочих токов.

«Большинство промышленных потребителей электроэнергии наряду с активной мощностью потребляют и реактивную мощность, которая расходуется на создание электромагнитных полей и является бесполезной. Наличие в электросети реактивной мощности снижает качество электроэнергии, приводит к увеличению платы за электроэнергию, дополнительным потерям и перегреву проводов, перегрузке подстанций, необходимости завышения мощности силовых трансформаторов и сечения кабелей, просадкам напряжения в электросети» [4].

Групповой коэффициент мощности предприятия получился равным 0,76. Рассчитаем мощности УКРМ для повышения коэффициента мощности до 0,95.

«Расчетная мощность УКРМ:

$$Q_{\text{КУ}} = \theta \cdot P_p \cdot (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) \quad (13)$$

$$Q_{\text{КУ}} = 0,9 \cdot 1647,73 \cdot (0,85 - 0,33) = 772 \text{ квар}$$

где  $\theta$  – коэффициент, учитывающий повышение коэффициента мощности;

$\operatorname{tg} \varphi_1$  – значение коэффициента до компенсации;

$\operatorname{tg} \varphi_2$  – значение коэффициента после компенсации» [4].

Принимаем к установке 2×УКРМ-0,4-375-25 (таблица 7) [7].

«Коэффициент потерь  $K_{\text{п}}$  для производств принимается равным 0,08» [4].

«Годовая экономия электроэнергии после установки УРКМ:

$$W_{\text{ЭК}} = W_{\text{Год}} \cdot \left(1 - \frac{\cos^2 \varphi_1}{\cos^2 \varphi_2}\right) \cdot K_{\text{П}} \quad (14)$$

$$\frac{W_{\text{ЭК}}}{W_{\text{Год}}} = \left(1 - \frac{\cos^2 \varphi_1}{\cos^2 \varphi_2}\right) \cdot K_{\text{П}} \quad (15)$$

$$\frac{W_{\text{ЭК}}}{W_{\text{Год}}} = \left(1 - \frac{\cos^2 \varphi_1}{\cos^2 \varphi_2}\right) \cdot K_{\text{П}} = \left(1 - \frac{0,76^2}{0,93^2}\right) \cdot 0,08 = 0,026$$

где  $W_{\text{Год}}$  – годовое потребление энергии;

$\cos^2 \varphi_1$  и  $\cos^2 \varphi_2$  – величины коэффициента мощности до и после внедрения УРКМ соответственно» [4].

Таблица 7 – Расчет компенсации реактивной мощности

Показатель	$P_y$	$\cos \varphi$	$tg \varphi$	$P_p$	$Q_p$	$S_p$	$I_p$
	кВт			кВт	квар	кВА	А
Без компенсации реактивной мощности	2539,76	0,76	0,85	1655,55	1403,79	2170,59	3132,98
Количество и мощность компенсирующего устройство	–	–	–	–	2×375	–	–
С компенсацией реактивной мощности	2539,76	0,93	0,39	1655,55	653,79	1779,97	2569,17

Вывод по разделу 3

Принимаем к установке 2×УРКМ-0,4-375-50. Коэффициент мощности теперь составляет 0,93. Экономия электроэнергии составила 2,6% от действующего показателя.

#### 4 Построение картограммы электрических нагрузок

Для достижения низкого значения потерь электроэнергии, необходимо определить оптимальное место размещения ТП. Для того, чтобы определить место размещения ТП, РУ и генераторной, необходимо провести расчет центров электрических нагрузок (ЦЭН) завода по производству холодильного оборудования [20].

Расчет ЦЭН с использованием типовых формул включает в себя определение координат наиболее крупных потребителей, а затем построение окружностей электрических нагрузок. Координаты и нагрузки потребителей завода позволят найти общий ЦЭН, где будет размещаться ТП, РУ и электрогенераторная.

«Координаты ЦЭН потребителей завода:

$$x_{ц} = \frac{\sum S_i x_i}{S_i}, y_{ц} = \frac{\sum S_i y_i}{S_i} \quad (16)$$

где  $S$  – нагрузка  $i$ -го потребителя, кВА;

$x_i, y_i$  – координаты ЦЭН  $i$ -го потребителя» [18].

«Радиус окружностей картограммы электрических нагрузок:

$$r_i = \sqrt{S/\pi \cdot m}, \quad (17)$$

где  $S$  – расчетная нагрузка  $i$ -го потребителя, кВА;

$m$  – масштаб для определения площади окружности (примем равным 2)» [19].

Вычисления проведенные для параметров картограммы нагрузок завода по изготовлению холодильного оборудования (рисунок 1) представлены в таблице 8.

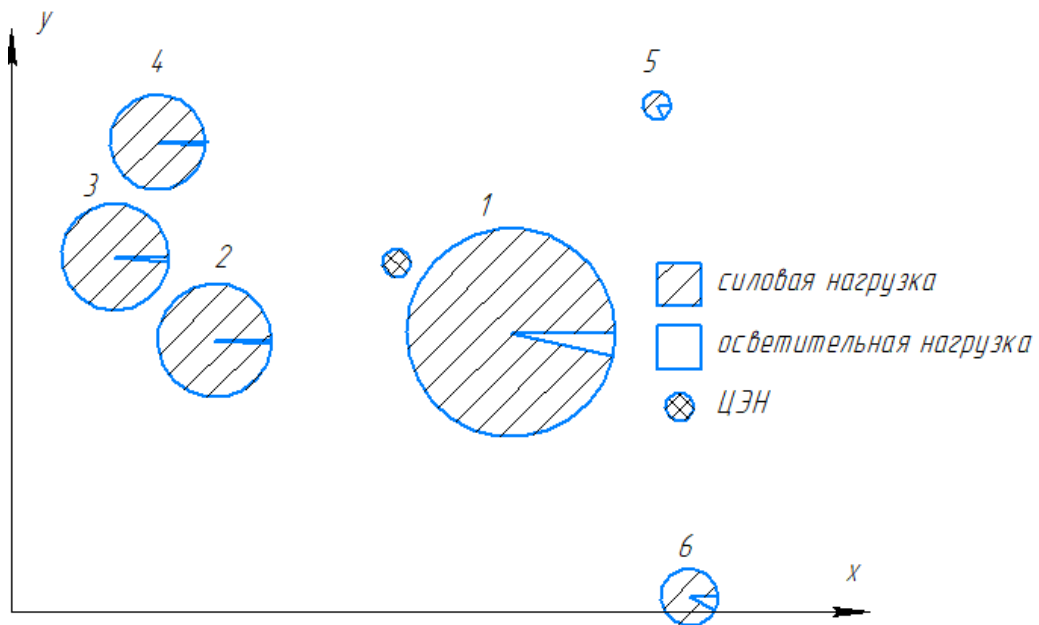


Рисунок 1 – Картограмма электрических нагрузок предприятия по изготовлению холодильного оборудования

Определим схему питания ТП исходя из конфигурации их расположения по заводу [19].

Таблица 8 – Расчетные значения картограммы электрических нагрузок завода

Производимая продукция	$X$	$Y$	$P$	$Q$	$S$	$r_i$
	м	м	кВт	квар	кВА	мм
Производство промышленных холодильных установок и агрегатов, а также холодильного оборудования общего исполнения	118	66	870,07	627,67	1072,84	26,13
Производство промышленных чиллеров, агрегатов и централей	48	66	473,00	294,99	557,45	18,84

Продолжение таблицы 8

Производимая продукция	$X$	$Y$	$P$	$Q$	$S$	$r_i$
	м	м	кВт	квар	кВА	мм
Производство трубопроводной арматуры (запорной, предохранительной, регулирующей) для систем подачи хладоносителя	24	87	448,84	249,07	513,31	18,08
Производство оборудование систем подачи воздуха (заслонок дроссельных)	36	115	366,37	186,41	411,07	16,18
Помещение хранения, погрузки и сортировки готовой продукции	156	123	156,07	13,85	156,68	9,99
Административно-технический корпус и заводоуправление	165	30	154,63	42,23	160,29	10,10

Вывод по разделу 4

Самую большую нагрузку и радиус на картограмме имеет цех по производству промышленных холодильных установок и агрегатов, а также холодильного оборудования общего исполнения.

## 5 Расчет потерь напряжения кабельных линий

Для электроснабжения электроприемников цеха по производству промышленных холодильных установок и агрегатов, холодильного оборудования общего исполнения воспользуемся кабелями марки ВВГнг-LS (таблица 9).

Таблица 9 – Кабельная ведомость цеха по производству промышленных холодильных установок и агрегатов, холодильного оборудования общего исполнения

Шифр	Оборудование	$S_{см},$ кВА	$S_{р},$ кВА	$I_{р},$ А	$F_{э},$ мм <sup>2</sup>	$n$	$F,$ мм <sup>2</sup>	$I_{доп},$ А	$L$
	Производство генераторов ледяной воды, холодильных и морозильных камер	420,03	395,97	571,53	184,36	3	70	231	11
1.1-1.5	Установка компрессорного оборудования и агрегатов	202,0	–	291,56	94,05	2	50	187	57
1.6	Установка запорно-регулирующей арматуры	20,66	–	29,82	9,62	1	10	79	22
1.7-1.11	Установка испарителей и вентиляторов	39,67	–	57,26	18,47	1	16	102	24
1.12,1.13	Установка конденсаторов и вентиляторов	35,32	–	50,98	16,45	1	16	102	33
1.14-1.16	Электроприводы приточной и вытяжной вентиляции	111,05	–	160,29	51,71	1	50	187	46
1.17	Установка производства кранов шаровых	9,66	–	13,94	4,50	1	4	47	24
1.18-1.21	Установка клапанов и КИП	5,44	–	7,85	2,53	1	2,5	36	40

Продолжение таблицы 9

Шифр	Оборудование	$S_{см},$ кВА	$S_p,$ кВА	$I_p,$ А	$F_э,$ мм <sup>2</sup>	$n$	$F,$ мм <sup>2</sup>	$I_{доп},$ А	$L$
Производство промышленных чиллеров, агрегатов и централей		257,3	255,01	368,08	118,74	2	50	187	36
2.22,2.23	Оборудование производства трехходовых клапанов	36,49	–	26,33	8,49	1	10	79	63
2.24,2.25	Оборудование производства заслонок дроссельного типа с электроприводом или ручным управлением	39,58	–	28,56	9,21	1	10	79	26
2.26-2.28	Установка линейных и рециркуляционных ресиверов	110,12	–	52,98	17,09	1	16	102	31
2.29,2.30	Установка теплообменного оборудования и радиаторов	44,89	–	32,4	10,45	1	10	79	69
2.31,2.32	Установка фильтров-осушителей и воздушных фильтров	23,56	–	8,5	2,74	1	2,5	36	23
2.33	Установка автоматики	3,29	–	4,75	1,53	1	2,5	36	46
Производство трубопроводов		199,45	186,92	269,8	87,03	2	50	187	36
3.34-3.36	Аппарат точечной, контактной и дуговой сварки	51,95	–	24,99	8,06	1	6	59	48
3.37,3.38	Разрезной станок	59,72	–	43,1	13,90	1	16	102	43
3.39-3.41	Шлифовальный станок	53	–	25,5	8,23	1	10	79	49
3.42,3.43	Токарный станок	24,07	–	17,37	5,60	1	6	59	39

Продолжение таблицы 9

Шифр	Оборудование	$S_{см},$ кВА	$S_p,$ кВА	$I_p,$ А	$F_э,$ мм <sup>2</sup>	$n$	$F,$ мм <sup>2</sup>	$I_{доп},$ А	$L$
3.44	Фрезерный станок	4,29	–	6,19	2,00	1	2,5	36	31
3.45-3.49	Мастерская	7	–	2,02	0,65	1	2,5	36	43
Монтажный цех		114,5	114,1	164,69	53,13	1	50	187	11
4.50,4.51	Пневмоустановка и электроинструмент для сборки агрегатов	67,63	–	48,81	15,75	1	16	102	50
4.52,4.53	Сварочная установка	39,21	–	28,3	9,13	1	10	79	61
4.54,4.55	Мастерская	11,14	–	8,04	2,59	1	2,5	36	43
Итого	–	988,62	949,15	1369,9	–	–	–	–	–

Затем проведем проверку кабельных линий по потерям напряжения на примере цеха по производству промышленных холодильных установок и агрегатов и холодильного оборудования общего исполнения.

«Потери напряжения в кабельных линиях определим по следующему выражению:

$$\Delta U = \frac{(P \cdot r_0 + Q \cdot x_0)}{U_{ном}} l \quad (18)$$

где  $r_0, x_0$  – активное и индуктивное сопротивление кабеля, Ом/км;

$l$  – длина кабеля, км;

$P, Q$  – активная и реактивная мощность проходящая через кабель»

[12].

Результаты расчетов по потерям напряжения представим в таблице 10.



Таблица 10 – Расчет по потерям напряжения

Шифр	Оборудование	$L$	$P_{см},$ кВт	$Q_{см},$ кВА	$r_0,$ Ом/км	$x_0,$ Ом/км	$\Delta U,$ В	$\delta U,$ %
	Производство генераторов ледяной воды, холодильных и морозильных камер	11	321,48	270,33	0,265	0,0612	2,8	0,74
1.1-1.5	Установка компрессорного оборудования и агрегатов	57	157,56	126,05	0,37	0,0625	9,43	2,48
1.6	Установка запорно-регулирующей арматуры	22	15,08	11,01	1,84	0,099	1,59	0,42
1.7-1.11	Установка испарителей и вентиляторов	24	28,56	27,42	1,2	0,095	2,21	0,58
1.12,1.13	Установка конденсаторов и вентиляторов	33	27,2	20,94	1,2	0,095	2,86	0,75
1.14-1.16	Электроприводы приточной и вытяжной вентиляции	46	81,07	76,21	0,37	0,0625	4	1,05
1.17	Установка производства кранов шаровых	24	7,44	5,73	0,095	0,107	0,08	0,02
1.18-1.21	Установка клапанов и КИП	40	4,57	2,97	7,55	0,116	3,48	0,92
	Производство промышленных чиллеров, агрегатов и централей	36	203,65	157,26	0,37	0,0625	7,67	2,02
2.22,2.23	Оборудование производства трехходовых клапанов	63	26,64	25,04	1,84	0,099	8,11	2,13
2.24,2.25	Оборудование производства заслонок дроссельного типа с электроприводом или ручным управлением	26	31,27	24,39	1,84	0,099	3,9	1,03
2.26-2.28	Установка линейных и рециркуляционных ресиверов	31	84,79	70,38	1,2	0,095	8,4	2,21

Продолжение таблицы 10

Шифр	Оборудование	$L$	$P_{см},$ кВт	$Q_{см},$ кВА	$r_0,$ Ом/км	$x_0,$ Ом/км	$\Delta U,$ В	$\delta U,$ %
2.29,2.30	Установка теплообменного оборудования и радиаторов	69	37,26	24,96	1,84	0,099	12,25	3,22
2.31,2.32	Установка фильтров-осушителей и воздушных фильтров	23	20,5	11,69	7,55	0,116	8,98	2,36
2.33	Установка автоматики	46	3,19	0,8	7,55	0,116	2,78	0,73
Производство трубопроводов		36	159,62	119,59	0,37	0,0625	5,99	1,58
3.34-3.36	Аппарат точечной, контактной и дуговой сварки	48	38,44	34,98	3,06	0,1	14,53	3,82
3.37,3.38	Разрезной станок	43	48,97	34,28	1,2	0,095	6,67	1,76
3.39-3.41	Шлифовальный станок	49	41,34	33,07	1,84	0,099	9,72	2,56
3.42,3.43	Токарный станок	39	20,94	11,94	3,06	0,1	6,36	1,67
3.44	Фрезерный станок	31	3,56	2,39	7,55	0,116	2,1	0,55
3.45-3.49	Мастерская	43	6,37	2,93	7,55	0,116	5,21	1,37
Монтажный цех		11	102,8	50,42	0,37	0,0625	1,13	0,30
4.50,4.51	Пневмоустановка и электроинструмент для сборки агрегатов	50	65,6	16,4	1,2	0,095	10,03	2,64
4.52,4.53	Сварочная установка	61	28,62	26,9	1,84	0,099	8,44	2,22
4.54,4.55	Мастерская	43	8,58	7,12	7,55	0,116	7,05	1,86

Вывод по разделу 5

Требования ПУЭ соблюдаются, поскольку потери в кабельных линиях самого мощного цеха менее 3,82%.

## 6 Анализ схемы электроснабжения

Работа завода по производству холодильного оборудования обеспечивается технологическим оборудованием I и II категории надежности. Поэтому необходимо использовать разные независимые источники питания.

Установим две газопоршневых установки марки G3512E (рисунок 2), позволяющие генерировать тепловую и электрическую энергию [22].

В качестве второго независимого источника питания, будут использоваться внешние электрические сети для того, чтобы обеспечить надежность электроснабжения потребителей завода производству холодильного оборудования.

Главным источником питания потребителей предприятия электроэнергией являются газопоршневые генераторные установки G3512E (мощность 1 кВт), резервным – внешние электросети.

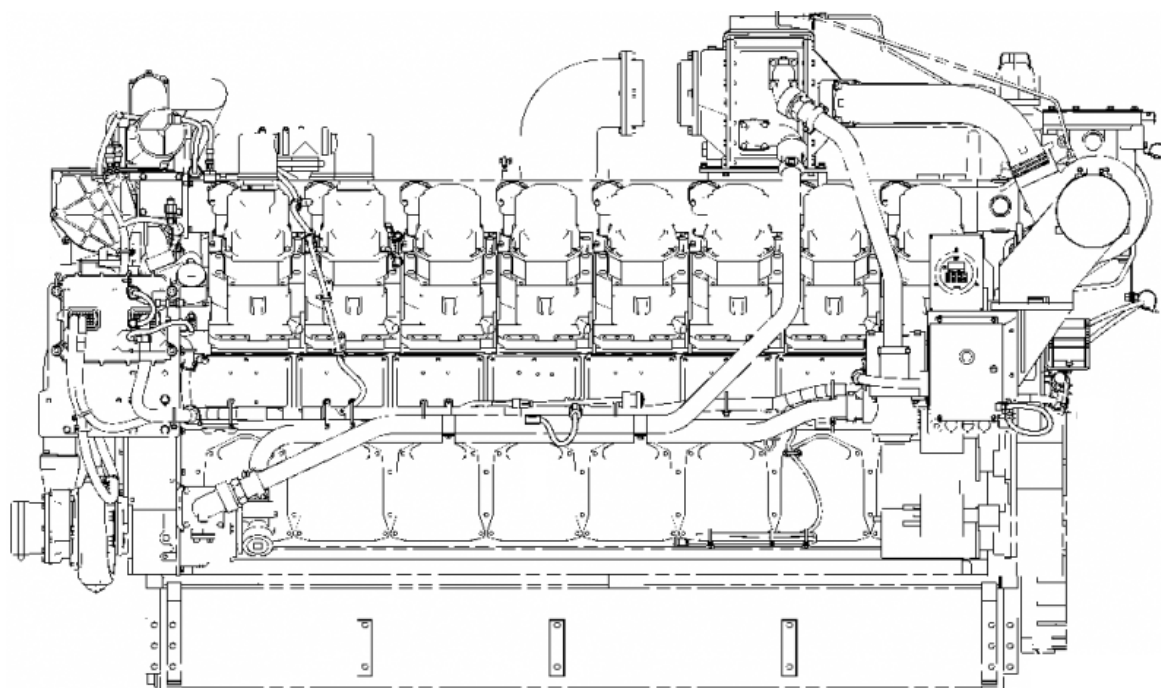


Рисунок 2 – Газопоршневая генераторная установка G3512E

Сети внутри завода следует смонтировать по смешанной схеме. Отдельные здания и цеха запитаны с использованием кабельных линий, а прилегающие к ТП, будут запитаны по магистральным шинопроводам.

Для работы от сетей электроснабжения необходимо установить два трансформатора ТМГ 1600/10, так как нагрузка завода составляет 1767 кВА при работе компенсирующих устройств.

«Схемы систем электроснабжения обычно проектируются с учетом требования обеспечения надежности электроснабжения производственно-технологического оборудования и вспомогательных служб, например, за счет резервирования» [1].

Основные потери в системе электроснабжения промышленного предприятия — потери в трансформаторах [21].

«Потери трансформаторов складываются из потерь х.х., которые имеются всегда, когда трансформатор включен в сеть, и нагрузочных потерь (потерь в обмотках). Потери х.х. постоянны во времени и могут меняться в большую сторону по мере старения и износа оборудования. Нагрузочные потери прямо пропорциональны квадрату тока, протекающего в обмотках трансформатора, при 100% загрузке трансформатора они равны потерям к.з. Требование резервирования трансформаторного оборудования приводит к росту потерь х.х» [1].

«Поскольку данный трансформатор является оборудованием резервного питания, то для снижения потерь, трансформатор следует отключить до возникновения аварии в действующем источнике питания» [1].

Электроснабжение от внешних сетей необходимо осуществить при отключении одной из двух G3512E, причем количество включенных в работу трансформаторов будет зависеть от нагрузки потребителей.

Вывод по разделу 6

Для обеспечения потребности в электроэнергии достаточно работы двух газопоршневых установок G3512E. ТМГ 1600/10 работают в резерве.

## 7 Расчет токов КЗ

«Проведем расчет токов КЗ на стороне 10 кВ перед трансформатором ТМГ 1600/10, а также на стороне ниже 1 кВ» [1].

Ток от системы до ТП:

$$I_c = \frac{S_T}{\sqrt{3} \cdot U}, \quad (19)$$
$$I_c = \frac{1600}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 147 \text{ А}$$

«Для экономической плотности тока  $J_{\text{эк}}=1,1 \text{ А/мм}^2$  получаем сечение» [10]:

$$S_c = \frac{I_c}{J_{\text{эк}}}, \quad (20)$$
$$S_c = \frac{147}{1,1} = 132 \text{ мм}^2$$

«Принимаем кабель по экономической плотности тока  $120 \text{ мм}^2$ . Марка кабеля – АПвБВ 3х120/35-10, допустимый ток которого составляет 265 А, поскольку кабель проложен в земле» [5].

«Удельные сопротивления кабеля:  $r_{\text{уд1}}=0,253 \text{ Ом/км}$ ,  $x_{\text{уд1}}=0,089 \text{ Ом/км}$ » [5].

Длина кабельной трассы от точки питания до ТП равна  $l_{\text{кл1}}=600 \text{ м}$ .

Активное и индуктивное сопротивление кабеля:

$$r_{\text{кл1}} = r_{\text{уд1}} \cdot l_{\text{кл1}}, \quad (21)$$
$$r_{\text{кл1}} = 0,253 \cdot 0,6 = 0,152 \text{ Ом}$$

$$x_{\text{кл1}} = x_{\text{уд1}} \cdot l_{\text{кл1}}, \quad (22)$$
$$x_{\text{кл1}} = 0,089 \cdot 0,6 = 0,053 \text{ Ом}$$

«Сопротивление системы» [16]:

$$x_c = \frac{U_6^2}{S_c}, \quad (23)$$

$$x_c = \frac{10,5^2}{500} = 0,221 \text{ Ом}$$

Общее сопротивление до точки К1:

$$x_{\Sigma K1} = x_c + x_{KL1}, \quad (24)$$

$$x_{\Sigma K1} = 0,221 + 0,053 = 0,274 \text{ Ом}$$

$$r_{\Sigma K1} = r_{KL1} = 0,152 \text{ Ом}$$

$$z_{\Sigma K1} = \sqrt{r_{\Sigma K1}^2 + x_{\Sigma K1}^2}, \quad (25)$$

$$z_{\Sigma K1} = \sqrt{0,152^2 + 0,274^2} = 0,313 \text{ Ом}$$

«Начальное действующее значение периодической составляющей трехфазного тока КЗ без учета подпитки от электродвигателей» [8]:

$$I_{\text{по}i} = \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot z_{\Sigma K_i}}, \quad (26)$$

$$I_{\text{по}K1} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 0,313} = 19,33 \text{ кА}$$

«Ударный ток» [8]:

$$i_{\text{уд}i} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{по}} \cdot K_{\text{уд}}, \quad (27)$$

$$i_{\text{уд}K1} = \sqrt{2} \cdot 19,33 \cdot 1,3 = 35,54 \text{ кА}$$

Рассчитаем ток КЗ точки К2 на стороне менее 1000 В, составив расчетную схему (рисунок 3) и схему замещения (рисунок 4).

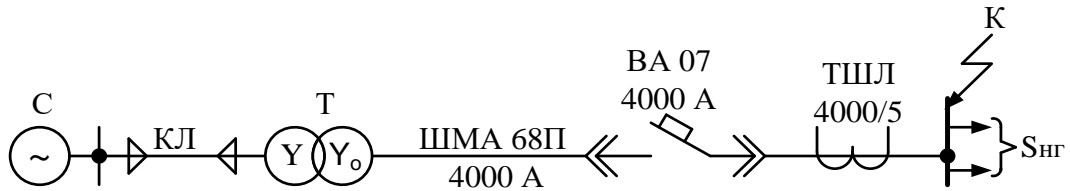


Рисунок 3 – Расчетная схема до 1 кВ

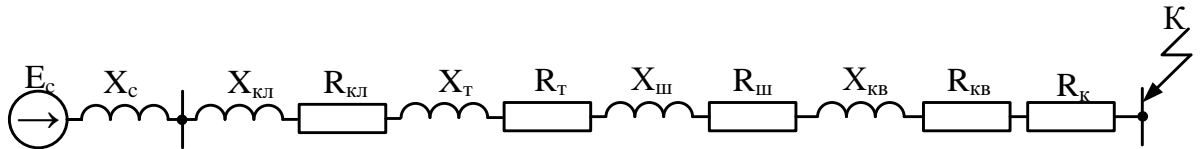


Рисунок 4 – Схема замещения до 1 кВ

«Сопротивления катушек и контактов автоматических выключателей примем равными  $r_{кв}=1,1$  мОм,  $x_{кв}=0,5$  мОм.

Активные и индуктивные сопротивления трансформаторов тока первого класса точности  $r_{тт}=0,2$  мОм,  $x_{тт}=0,3$  мОм.

Активное сопротивление контактов  $r_к=0,1$  мОм» [8].

Перерасчет сопротивления ступени ВН на ступень НН:

$$x_{\Sigma K1}' = x_{\Sigma K1} \frac{U_{НН}^2}{U_{ВН}^2}, \quad (28)$$

$$x_{\Sigma K1}' = 274 \cdot \frac{0,4^2}{10,5^2} = 0,4 \text{ мОм}$$

$$r_{\Sigma K1}' = r_{\Sigma K1} \frac{U_{НН}^2}{U_{ВН}^2}, \quad (29)$$

$$r_{\Sigma K1}' = 151,8 \cdot \frac{0,4^2}{10,5^2} = 0,22 \text{ мОм}$$

Сопротивление ТМГ 1600/10/0,4:

$$x_T = \sqrt{u_K^2 - \left(\frac{100 \cdot P_{K3}}{S_T}\right)^2} \cdot \frac{U_{НН}^2}{S_T} \cdot 10^4, \quad (30)$$

$$x_T = \sqrt{6^2 - \left(\frac{100 \cdot 16,5}{1600}\right)^2} \cdot \frac{0,4^2}{1600} \cdot 10^4 = 9,23 \text{ мОм}$$

$$r_T = \frac{P_{K3} \cdot U_{HH}^2}{S_T^2} \cdot 10^6, \quad (31)$$

$$r_T = \frac{16,5 \cdot 0,4^2}{1600^2} \cdot 10^6 = 2,64 \text{ мОм}$$

«Активное и индуктивное сопротивление цепи до точки К2» [8]:

$$r_{\Sigma K2} = r'_{\Sigma K1} + r_K + r_{KB} + r_{TT} + r_T + r_{KL2}, \quad (32)$$

$$r_{\Sigma K2} = 0,2 + 0,1 + 1,1 + 0,2 + 4,24 + 26 = 25,2 \text{ мОм}$$

$$x_{\Sigma K2} = x'_{\Sigma K1} + x_{KB} + x_{TT} + x_C + x_T + x_{KL2}, \quad (33)$$

$$x_{\Sigma K2} = 0,39 + 0,5 + 0,3 + 0,221 + 8,61 + 15,4 = 31,84 \text{ мОм}$$

«Начальное действующее значение периодической составляющей трехфазного тока К3 без учета подпитки от электродвигателей» [8]:

$$I_{п0K2} = \frac{0,4}{\sqrt{3 \cdot (31,84^2 + 25,2^2)}} = 5,69 \text{ кА}$$

«Угол сдвига по фазе напряжения (ЭДС источника) и периодической составляющей тока К3» [8]:

$$\psi_i = \arctg\left(\frac{x_{\Sigma K2}}{r_{\Sigma K2}}\right), \quad (34)$$

$$\psi_{K2} = \arctg\left(\frac{25,2}{31,84}\right) = 0,67$$

«Время от начала К3 до появления ударного тока» [8]:

$$\zeta_i = 0,01 \cdot \frac{\frac{\pi}{2} + \psi}{\pi}, \quad (35)$$

$$\zeta_{K2} = 0,01 \cdot \frac{\frac{3,14}{2} + 0,67}{3,14} = 7,13$$



«Постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ» [8]:

$$T_{ai} = \frac{x_{\Sigma Ki}}{r_{\Sigma Ki} \cdot \omega}, \quad (36)$$

$$T_{aK2} = \frac{25,83}{31,84 \cdot 314} = 2,52 \text{ мс}$$

«Ударный коэффициент» [8]:

$$K_{уди} = 1 + \sin \psi_i \cdot e^{\frac{-\zeta_i}{T_{ai}}}, \quad (37)$$

$$K_{удK2} = 1 + \sin(0,71) \cdot 2,71^{\frac{-7,26}{2,52}} = 1,06$$

«Ударный ток» [8]:

$$i_{уди} = \sqrt{2} \cdot I_{пои} \cdot K_{уди} \quad (38)$$

$$i_{удK2} = \sqrt{2} \cdot 5,69 \cdot 1,06 = 8,53 \text{ кА}$$

Вывод по разделу 7

На стороне выше 1 кВ ударный ток составил 35,54 кА, а на стороне ниже 1 кВ – 8,53 кА.

## 8 Выбор и проверка оборудования

«Ток термической стойкости для точки К2» [2]:

$$B_{ki} = (I_{\text{п0i}})^2 (T_{\text{ai}} + t_{\text{пво}}) \quad (39)$$
$$B_{\text{кк2}} = 5,7^2 \cdot (2,72 + 30) \cdot 10^{-3} = 1,06 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

Время действия релейной защиты:

$$\tau = t_{\text{рз}} + t_{\text{сво}} \quad (40)$$
$$\tau = 0,02 + 0,03 = 0,05 \text{ с}$$

где  $t_{\text{рз}}$  – время срабатывания релейной защиты с;

$t_{\text{сво}}$  – время срабатывания выключателя на отключение, с» [17].

Максимальное значение аperiodической составляющей тока К3» [2]:

$$i_{\text{ати}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{п0i}} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_{\text{ai}}}} \quad (41)$$
$$i_{\text{атк2}} = \sqrt{2} \cdot 5,7 \cdot 2,72^{\frac{-0,05}{2,72}} = 7,91 \text{ кА}$$

Номинальное значение аperiodической составляющей:

$$i_{\text{аном}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ном.откл}} \cdot (1 + e^{-22,5\tau}) \quad (42)$$
$$i_{\text{аном}} = \sqrt{2} \cdot 80 \cdot (1 + 2,72^{-22,5 \cdot 0,05}) = 150 \text{ кА}$$

где  $I_{\text{ном.откл}}$  – номинальный ток отключения выключателя, кА» [2].

Характеристики и расчет выключателя приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Характеристики выключателя ВА-45/4000 3Р 80кА [2]

Расчетные данные	Единица измерения	Каталожные данные
$U_{ном}=400$	В	$U_{сет.ном}=400-690$
$I_{max}=3609$	А	$I_{ном}=4000$
$I_{п0}=5,7$	кА	$I_{ном.откл}=80$
$i_{от}=7,91$	кА	$i_{а.ном}=150$
$i_{уд}=8,53$	кА	$i_{прс}=100$
$B_K=1,06$	кА <sup>2</sup> ·с	$B_K=102$

Выбор разъединителей и трансформаторов тока проводится по параметрам, представленным в таблице 12.

Таблица 12 – Характеристики разъединителя РЕ19-47-4000А-ИП [11] и трансформатора тока ТТЕ125-4000/5А [15]

Расчетные данные	Единица измерения	Разъединитель	Трансформатор тока
$U_{ном}=400$	В	$U_{сет.ном}=400-690$	$U_{сет.ном}=690$
$I_{max}=3609$	А	$I_{ном}=4000$	$I_{ном}=4000$
$i_{уд}=8,53$	кА	$i_{прс}=100$	$i_{прс}=100$
$B_K=1,06$	кА <sup>2</sup> ·с	$B_K=48$	$B_K=48$

Помимо вышеприведенных параметров, трансформаторы тока выбираются (таблица 13):

- по конструкции и классу точности;
- по вторичной нагрузке ( $Z_2 \leq Z_{ном2}$ )» [15].

Таблица 13 – Характеристики ТТЕ125-4000/5А [15]

Параметр	Значение параметра
Номинальный вторичный ток	5 А
Номинальная вторичная мощность	15 ВА
Класс точности	0,5S

Составим расчетную таблицу вторичной нагрузки трансформатора тока (таблица 14).

Таблица 14 – Расчет вторичной нагрузки трансформатора тока

Наименование прибора	Тип прибора	Нагрузка, выраженная в ВА на одну фазу		
		А	В	С
Амперметр	Э-335	–	0,5	–
Ваттметр	Д-335	–	0,5	0,5
Варметр				
Счетчики активной энергии	САЗ-И670	–	2,5	–
Итого	–	–	3,5	0,5

«Общее сопротивление приборов фазы В:

$$R_{\text{приб}} = \frac{S_{\text{приб}}}{I_{\text{ном2}}^2} \quad (43)$$

$$R_{\text{приб}} = \frac{3,5}{5^2} = 0,14 \text{ Ом.}$$

где  $S_{\text{приб}}$  – мощность, потребляемая приборами, ВА;

$I_{\text{ном2}}$  – вторичный ток трансформатора тока» [1].

Номинальное полное сопротивление нагрузки:

$$Z_{\text{ном2}} = \frac{S_{\text{ном2}}}{I_{\text{ном2}}^2} \quad (44)$$

$$Z_{\text{ном2}} = \frac{20}{5^2} = 0,8 \text{ Ом}$$

где  $S_{\text{ном2}}$  – номинальная вторичная нагрузка трансформатора, выраженная через полную мощность, которая берется из каталога, ВА» [1].

«Сопrotивление проводов:

$$R_{\text{пр}} = Z_{\text{ном2}} - R_{\text{приб}} - R_{\text{к}} \quad (45)$$
$$R_{\text{пр}} = 0,8 - 0,14 - 0,1 = 0,56 \text{ Ом.}$$

где  $R_{\text{к}}=0,1$  – переходное сопротивление контактов, Ом» [1].

Длину проводов примем 0,5 м. Тогда для неполной звезды получаем расчетную длину 0,87 м. Рассчитаем сечение проводов по следующей формуле:

$$S = \frac{\rho \cdot l_{\text{п}}}{R_{\text{пр}}} \quad (46)$$
$$S = \frac{0,027 \cdot 0,5}{0,56} = 0,024 \text{ мм}^2$$

где  $\rho=0,027$  – удельное сопротивление алюминиевых соединительных проводов, Ом·мм<sup>2</sup>/м» [1].

Округляем до ближайшего стандартного сечения 4 мм<sup>2</sup>.

Вывод по разделу 8

В результате принимаем к установке:

- разъединители РЕ19-47-4000А-ИП;
- автоматический выключатель ВА-45/4000-3Р 80кА;
- трансформаторы тока ТТЕ125-4000/5А.

## 9 Расчет релейной защиты и автоматики

«Основными видами повреждения в трансформаторе являются: замыкания между фазами внутри кожуха трансформатора и на наружных выводах обмоток; замыкания в обмотках между витками одной фазы (витковые замыкания); замыкания на землю обмоток или их наружных выводов, повреждения магнитопровода трансформатора, приводящие к появлению местного нагрева пожара.

Для трансформаторов с высшим напряжением 10(6) кВ должны быть предусмотрены устройства релейной защиты от следующих видов повреждений и ненормальных режимов работы:

- междуфазных коротких замыканий в обмотках и на выводах (токовая отсечка без выдержки времени);
- токов в обмотках, обусловленных внешними КЗ (максимальная токовая защита);
- токов в обмотках, обусловленных перегрузкой (максимальная токовая защита от перегрузки)» [17].

Защиту трансформатора ТМГ-1600/10/0,4 рассчитаем для схемы соединения  $Y/Y_0-0$ .

«Максимальное время защиты линий, отходящих от шин НН трансформатора, приравняем к собственному времени отключения выключателей  $t_{\text{макс}}=0,03$  с» [17].

Максимальную токовую защиту и токовую отсечку выполним на базе микропроцессорной защиты SEPAM T-20.

«SEPAM серии 20 представляет собой терминал для использования в простых защитах одного присоединения, основанных на измерении токов или напряжений. Например: защита воздушных линий со встроенным АПВ; защита вводов и фидеров подстанции от междуфазных КЗ и замыканий на землю; защита трансформаторов 10 (6) кВ малой мощности от перегрузок (в том числе тепловая защита с учетом температуры окружающей среды и двумя

группами уставок для разных режимов обдува); защита двигателей от внутренних повреждений и повреждений, зависящих от нагрузки с контролем режима пуска, включая защиту от перегрузок (в том числе термическая защита с учетом температуры окружающей среды и кривой холодного состояния, которую можно отрегулировать в соответствии с характеристиками двигателя. Для цифровых терминалов SEPAM уставки рассчитываются и задаются в первичных величинах или в процентах от номинальных значений» [17].

На рисунке 5 приведем схему релейной защиты трансформатора.

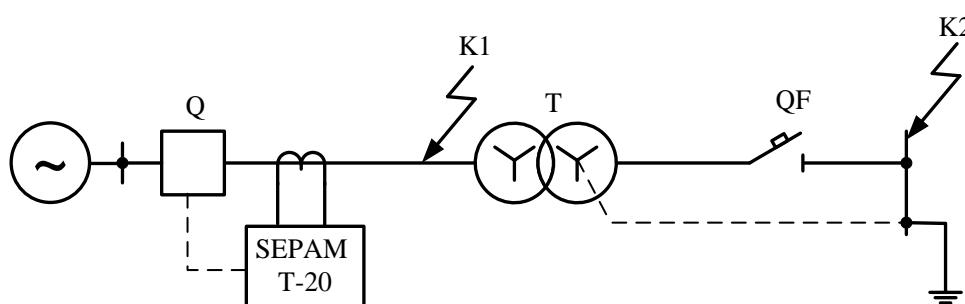


Рисунок 5 – Расчетная схема релейной защиты трансформатора ТМГ-1600/10/0,4

«Токовая отсечка может применяться для защиты трансформаторов до 4 МВА» [10].

«Уставка токовой отсечки:

$$I_{\text{ТО}} = I_{\text{НН}}^{(3)} \cdot k_{\text{отс}} \quad (47)$$

$$I_{\text{ТО}} = 5,8 \cdot \left(\frac{0,4}{10}\right) \cdot 10^3 \cdot 1,1 = 255 \text{ А}$$

где  $I_{\text{НН}}^{(3)}$  – значение тока трехфазного КЗ на выводах обмотки 0,4 кВА;

$k_{\text{отс}}$  – коэффициент отстройки учитывающий погрешность при расчете значений токов КЗ» [17].

«Защита не должна срабатывать при включении трансформатора от броска намагничивающего тока:

$$I_{\text{ТО}} = I_{\text{НОМ.Т}} \cdot k_{\text{ОТС}} \quad (48)$$
$$I_{\text{ТО}} = \frac{1600}{\sqrt{3} \cdot 10,5} \cdot 1,1 = 97 \text{ А}$$

Принимаем ток срабатывания 255 А.

Двухфазный ток КЗ:

$$I_{\text{ВН}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\text{ВН}}^{(3)} \quad (49)$$
$$I_{\text{ВН}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 19,33 = 16,74 \text{ кА.}$$

Коэффициент чувствительности» [17]:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{ВН}}^{(2)}}{I_{\text{ТО}}} \quad (50)$$
$$k_{\text{ч}} = \frac{16740}{255} = 66$$

Защита чувствительна, так как коэффициент больше 2 [10].

«Максимальная токовая защита трансформатора устанавливается со стороны вводов 10 кВ и является одновременно защитой ввода рабочего питания 0,4 кВ. На линиях 10 кВ МТЗ является единственной защитой от междуфазных КЗ, так как при защите этих линий быстродействующие защиты не применяются. МТЗ выполняет функцию резервной защиты токовых защит трансформатора при их отказе или выводе из действия. Выбор уставок срабатывания МТЗ осуществляется из условия несрабатывания защиты при самозапуске электродвигателей. Причем, значения токов самозапуска могут значительно превышать номинальные значения токов трансформатора. При использовании в качестве защиты цифровых терминалов SEPAM защита выполняется с применением трансформаторов тока в трех фазах» [17].



«Защита с учетом токов самозапуска электродвигателей:

$$I_{сз} = I_{ВН}^{max} \cdot \frac{k_n \cdot k_{сзп}}{k_B} \quad (51)$$

$$I_{сз} = \frac{1600}{\sqrt{3} \cdot 10} \cdot \frac{1,1 \cdot 1,3}{0,935} = 141 \text{ А}$$

где  $k_{сзп}$  – коэффициент самозапуска электродвигателей,  $k_{сзп} = 1,3 \div 1,5$ .

$I_{ВН}^{max}$  – максимальный нагрузочный ток на стороне ВН, А» [17].

«Рассчитаем чувствительность МТЗ:

$$I_{\text{нн}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\text{нн}}^{(3)} \quad (52)$$

$$I_{\text{нн}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 19,33 \cdot \left(\frac{0,4}{10}\right) \cdot 10^3 = 670 \text{ А}$$

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{нн}}^{(2)}}{I_{сз}} \quad (53)$$

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{нн}}^{(2)}}{I_{сз}} = \frac{670}{141} = 4,75$$

где  $I_{\text{нн}}^{(2)}$  – ток двухфазного КЗ на стороне 0,4 кВ» [17].

Защита чувствительна, так как коэффициент больше 1,5 [10].

Вывод по разделу 9

Требования ПУЭ соблюдаются, поскольку токовая отсечка имеет коэффициент чувствительности 66, а МТЗ – 4,75.

## Заключение

В результате выполнения ВКР, спроектирована система электроснабжения предприятия по производству холодильного оборудования ООО «Термосистемы-С».

В качестве исходных данные ВКР были использованы:

- информация об электроприемниках и о технологическом оборудовании отдельных цехов предприятия, а также план их размещения;
- генеральный план завода.

На первом этапе были рассчитаны электрические нагрузки электроприемников наиболее мощного цеха, а также силовая нагрузка всех цехов по заводу в целом.

Нагрузка внутривзаводского освещения включает в себя наружное освещение прилегающих территорий, а также внутреннее освещение цехов, производств и зданий предприятия.

Затем была рассчитана общая электрическая нагрузка, которая позволила определить требуемые к установке компенсирующие устройства – 2×УКРМ-0,4-350-25.

Поскольку электрическая нагрузка по предприятию распределяется неравномерно, то в соответствии с этим была построена картограмма электрических нагрузок, что позволило определить место установки электрогенераторной завода по производству холодильного оборудования.

Для обеспечения бесперебойного и надежного питания потребителей приняты в качестве основного источника питания две газопоршневые установки G3512E мощностью 1000 кВт, а в качестве резервного – два трансформатора ТМГ 1600 10/0,4.

В заключении ВКР проведен расчет токов КЗ на сторонах ВН и НН, выбор силового электрооборудования и релейной защиты для стабильной работы системы электроснабжения завода.

## Список используемых источников

1. Вахнина В.В. Проектирование систем электроснабжения // Электрон. учеб.-метод. пособие ТГУ; Ин-т энергетики и электротехники; каф. «Электроснабжение и электротехника». Тольятти : Изд-во ТГУ, 2016. 78 с.
2. Выключатель автоматический ВА-45 4000/4000 3P 80кА [Электронный ресурс] : Официальный сайт производителя электротехнической продукции ЕКФ. URL: <https://ekfgroup.com/catalog/products/vyklyuchatel-avtomaticheskij-va-45-4000-4000-3p-80ka-vukatnoj-ekf-proxima> (дата обращения: 16.10.2023).
3. ГОСТ Р 55710-2013 Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений [Электронный ресурс]: утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 08.11.2013 N 1364-ст. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200105707> (дата обращения: 16.10.2023).
4. Для чего нужен УКРМ? [Электронный ресурс] : Официальный сайт диллера электрооборудования Ortea. URL: [http://orteastore.ru/info/dlya\\_chego\\_ukrm/](http://orteastore.ru/info/dlya_chego_ukrm/) (дата обращения: 16.10.2023).
5. Кабель АПВБВ [Электронный ресурс] : Официальный сайт КПС (кабельная поисковая система). URL: <https://k-ps.ru/spravochnik/kabeli-silovyie/s-izolyacziej-iz-sshitogo-polietilena-10kv/apvbv-10kv/kabel-apvbv-3x50-16.html> (дата обращения: 16.10.2023).
6. Каталог светильников АСЗТ [Электронный ресурс] : Официальный сайт международной светотехнической корпорации АСЗТ. URL: <https://astz.ru/> (дата обращения: 16.10.2023).
7. Конденсаторная установка УКРМ-0,4-350-25 У3 [Электронный ресурс] : Официальный сайт завода по производству электрощитового оборудования «Элком-Энерго». URL: <https://elcom-energo.ru/catalog/kondensatornye-ustanovki-0-4-kv-krm-ukrm-aukrm-ukm58-aku-kku-i-drugie/reguliruemye-kondensatornye-ustanovki-ukrm-0-4/kondensatornaya-ustanovka-ukrm-0-4-350-25-u3/> (дата обращения: 16.10.2023).

8. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением ниже 1 кВ [Электронный ресурс] : ГОСТ 28249-93 утв. приказом от 21.10.1993. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-28249-93> (дата обращения: 16.10.2023).

9. НТП ЭПП-94 Проектирование электроснабжения промышленных предприятий [Электронный ресурс] : Нормы технологического проектирования (1 редакция) принятые Тяжпромэлектропроект от 01.01.1994. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200030085> (дата обращения: 16.10.2023).

10. Правила устройства электроустановок. 7-е издание / Ред. Л.Л. Жданова, Н. В. Ольшанская. М.: НЦ ЭНАС, 2013. 104 с.

11. Разъединитель PE19-47-72260-4000А-ИП-УХЛЗ-КЭАЗ [Электронный ресурс] Официальный сайт отечественного производителя оборудования АО «КЭАЗ» : URL: <https://keaz.ru/catalog/product/119993> (дата обращения: 16.10.2023).

12. Расчет сетей по потерям напряжения [Электронный ресурс] : интернет-сайт. URL: <http://electricalschool.info/main/elsnabg/905-raschet-setejj-ro-poterjam-naprjazhenija.html> (дата обращения: 16.10.2023).

13. РТМ 36.18.32.4-92 Указания по расчету электрических нагрузок [Электронный ресурс] : Руководящий технический материал утв. техническим циркуляром ВНИПИ Тяжпромэлектропроект от 30.07.1992 N 359-92. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200032239> (дата обращения: 16.10.2023).

14. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение [Электронный ресурс]: Свод правил. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 утв. Приказом Минстроя России от 07.11.2016 N 777/пр. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456054197> (дата обращения: 16.10.2023).

15. Трансформатор тока ТТЕ-125-4000/5А [Электронный ресурс] : Официальный сайт производителя электротехнической продукции ЕКФ. URL: <https://ekfgroup.com/catalog/products/transformator-toka-tte-125-4000-5a-klass-tochnosti-0-5s-ekf-proxima> (дата обращения: 16.10.2023).

16. Трансформаторы силовые. Общие технические условия [Электронный ресурс] : ГОСТ Р 52719-2007 утв. приказом №60-ст от 09.04.2007. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200050072> (дата обращения: 16.10.2023).

17. Требования к релейной защите [Электронный ресурс] : интернет-сайт. URL: <https://pue8.ru/relejnaya-zashchita/238-trebovaniya-k-relejnoj-zashchite.html> (дата обращения: 16.10.2023).

18. Abdulhakim Amer A.Agl, Yousif M.Hamad, Tarek A.Hamad, John W.Sheffield. Study of energy recovery and power generation from alternative energy source [Text] / Missouri University of Science and Technology, Mechanical and Aerospace Engineering. - 2015. - PP. 1-7. - URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X14000227> (дата обращения: 16.10.2023).

19. Binbin Zhao, Yang Chen, Yuhan Lei. Energy-saving House based on the Healthy-Housing theory in Sanjiangyuan, Qinghai [Text] / E3S Web of Conferences. - 2019. - PP. 1-4. - URL: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/62/e3sconf\\_icbte2019\\_03028.pdf](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/62/e3sconf_icbte2019_03028.pdf) (дата обращения: 16.10.2023).

20. Fernandes H. S., Moura M. B., Guadalupe P. C., Fortes M. Z., and Fernandes N. C.. Software to manage transformers using intelligent electronic device [Text] / Universidad Nacional de Colombia. - 2016. - PP. 1-5. - URL: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ingainv/article/view/48104> (дата обращения: 16.10.2023).

21. Małgorzata Basińska, Halina Koczyk. Analysis of the possibilities to achieve the low energy residential buildings standards [Text] / Technological and Economic Development of Economy. - 2016. - URL: <https://journals.vgtu.lt/index.php/TEDE/article/view/786> (дата обращения: 16.10.2023).

22. Valerio R.M. Lo Verso, Anna Pellegrino. Energy Saving Generated Through Automatic Lighting Control Systems According to the Estimation Method

of the Standard EN 15193-1 [Text] / Journal of Daylighting. - 2019. - URL:  
<https://solarlits.com/jd/6-131> (дата обращения: 16.10.2023).