

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 промышленного предприятия по
производству авиационной техники

Обучающийся

Д.Г. Захаров

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, С.В. Шаповалов

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

Консультант

к.филол.н., доцент С.Ю. Мамушкина

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

Тольятти 2025

Аннотация

«Данная выпускная квалификационная работа посвящена проектированию системы электроснабжения для промышленного предприятия по производству авиационной техники, в частности, для обеспечения надежной и эффективной работы производственных подразделений. Актуальность работы определяется растущими требованиями к энергоэффективности, надежности и безопасности энергоснабжения на современных промышленных предприятиях, особенно в высокотехнологичных отраслях, таких как авиастроение.

В рамках данной работы был проведен анализ текущего состояния электроснабжения, включая оценку электрических нагрузок, характеристик используемого оборудования и соответствия нормативным требованиям. На основе анализа» [3] и с учетом особенностей производственного процесса, были разработаны расчеты, определяющие необходимые электрические нагрузки для различных цехов, выбор оптимальной схемы электроснабжения с учетом категории надежности потребителей и требования к качеству электроэнергии. В частности, выполнен светотехнический расчет для обеспечения нормативных уровней освещенности в производственных помещениях, а также произведен расчет электрических нагрузок системы освещения, учитывающий применение энергоэффективных источников света.

В ходе работы выполнен подбор электрооборудования, включая трансформаторы, коммутационную аппаратуру, кабельные линии, системы релейной защиты и автоматики. Особое внимание уделено выбору оборудования, обеспечивающего максимальную энергоэффективность, надежность и безопасность эксплуатации. Разработана принципиальная схема электроснабжения предприятия, включающая в себя как основные, так и резервные источники питания, что обеспечивает бесперебойную работу производственных линий.

Abstract

This final qualifying thesis is devoted to the design of an electric power supply system for an industrial enterprise for the production of aviation equipment, in particular, to ensure reliable and efficient operation of production units. «The relevance of the work is determined by the growing demands on energy efficiency, reliability and safety of energy supply in modern industrial enterprises, especially in high-tech industries such as aircraft manufacturing.

As part of this work, an analysis of the current state of the power supply was carried out, including an assessment of electrical loads, the characteristics of the equipment used and compliance with regulatory requirements. Based on the analysis and taking into account the specifics of the production process, calculations were developed that determine the necessary electrical loads for various workshops, the choice of the optimal power supply scheme, taking into account the category of consumer reliability and the requirements for the quality of electricity.

In particular, a lighting engineering calculation was performed to ensure the standard illumination levels in industrial premises, as well as the calculation of the electrical loads of the lighting system, taking into account the use of energy-efficient light sources.» [5]

During the work, electrical equipment was selected, including transformers, switching equipment, cable lines, relay protection and automation systems. Special attention is paid to the selection of equipment that ensures maximum energy efficiency, reliability and operational safety. A schematic diagram of the company's power supply has been developed, which includes both main and backup power sources, which ensures uninterrupted operation of production lines.

Содержание

Введение	5
1 Характеристика объекта проектирования.....	6
2 Расчет электрических нагрузок	8
3 Выбор типа, числа и мощности трансформаторов цеховых ПС.....	13
4 Определение местоположения ГПП.....	16
5 Выбор типа, числа и мощности трансформаторов ГПП	21
6 Расчет токов коротких замыканий	23
7 Выбор и проверка оборудования на стороне 10 кВ ГПП.....	26
8 Расчет освещения производственного цеха.....	32
9 Расчет электрических нагрузок системы освещения	45
Заключение	49
Список используемых источников	51

Введение

В условиях динамичного развития авиационной промышленности, характеризующегося постоянным внедрением новых технологий и расширением производственных мощностей, требования к системам электроснабжения (ЭС) промышленных предприятий по производству авиационной техники претерпевают существенные изменения. Современные ЭС должны не только обеспечивать надежное и бесперебойное электропитание, но и обладать высокой степенью гибкости, позволяющей адаптироваться к изменяющимся потребностям производства, в том числе к увеличению нагрузок и внедрению нового оборудования.

Особое значение приобретает надежность электроснабжения для критически важных производственных участков, таких как участки механической обработки, сборки и испытаний авиационной техники, где даже кратковременные перебои в электропитании могут привести к срыву производственного цикла, повреждению дорогостоящего оборудования и значительным финансовым потерям.

Данная работа направлена на разработку системы электроснабжения, соответствующей всем действующим нормам и правилам безопасности, для промышленного предприятия по производству авиационной техники, обеспечивая безопасные условия труда и минимизацию рисков поражения электрическим током.

Для достижения данной цели необходимо рассмотреть следующие темы:

- расчет электрических нагрузок;
- выбор типа, мощности трансформаторов цеховых подстанций;
- определение местоположения ГПП;
- расчет токов коротких замыканий;
- расчет электрических нагрузок системы освещения.

1 Характеристика объекта проектирования

В данном разделе подробно анализируется производственная структура предприятия, определяющая состав и характеристики электроприемников, а также выявляются особенности технологических процессов, влияющие на требования к надежности электроснабжения.

Мощности электроприемников приведены в таблице 1. Высоковольтные электроприемники представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Мощности электроприемников по цехам предприятия

№ цеха на плане завода	Название цеха	ΣP_n , кВт	n_{Σ} , шт.
1	Сборочный цех	3670	107
2	Прессовой цех	11206	301
3	Цех шасси	8311	281
4	Заводоуправление	1,52	22
5	Моторный цех № 1	4447	240
6	Моторный цех № 2	3313	137
7	Литейный цех № 1	4737	72
8	Литейный цех № 2	8224	154
9	Литейный цех № 3	7884	150
10	Ремонтно-механический цех	871	32
11	Компрессорно-насосная станция	401	18

Таблица 2 – Перечень высоковольтных электроприемников

№ цеха на плане завода	Наименование цеха, отделения, участка	Вид высоковольтных ЭП	P_n , кВт	n_{Σ} , шт.	U_{Σ} , кВ
7	Литейный цех № 1	Преобразователи частоты	250	2	10
8	Литейный цех № 2	Электрические печи (с трансформаторами)	1250	3	10
9	Литейный цех № 3	Электрические печи (с трансформаторами)	630	5	10

Детальный анализ перечня позволяет классифицировать электроприемники по категориям надежности электроснабжения, выявить

особенности их работы и определить необходимые параметры для «проектирования системы электроснабжения.

Генеральный план завода представлен на рисунке 1.

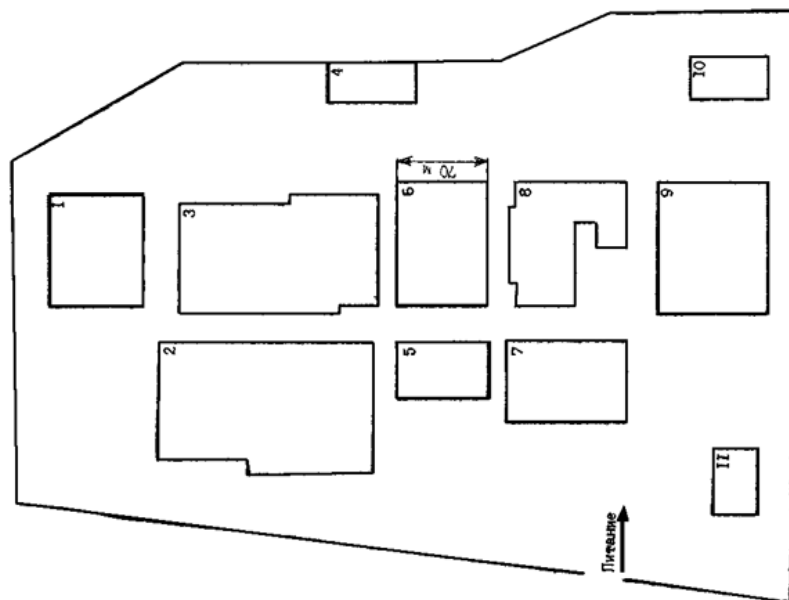


Рисунок 1 – Генплан системы электроснабжения автомобильного завода.

Генеральный план завода является важнейшим исходным документом для проектирования системы электроснабжения,» [7] определяющим размещение зданий, сооружений и основного технологического оборудования, влияющим на трассировку кабельных линий и выбор мест установки подстанций.

Вывод:

Были выявлены ключевые параметры, определяющие систему электроснабжения: состав и мощность электроприемников, технологические особенности.

2 Расчет электрических нагрузок

Точное определение электрических нагрузок является критически важным этапом в проектировании и последующей эксплуатации системы ЭС промышленного предприятия по производству авиационной техники, обеспечивая корректный выбор электрооборудования и эффективное управление энергопотреблением.

«Для определения расчетных нагрузок на различных уровнях системы электроснабжения, в том числе на напряжении 0,4 кВ для цехов предприятия, используется метод, основанный на учете средней потребляемой мощности в пиковый период и коэффициенте максимальной загрузки, обеспечивающий высокую точность при наличии детальной информации о каждом электроприемнике.

В рамках данного проекта, путем анализа состава и характеристик предполагаемого электрооборудования каждого цеха, будут определены значения коэффициентов использования и коэффициентов мощности для типичных электроприемников, используя справочные данные, что позволит произвести расчет активных и реактивных электрических нагрузок (формулы (1) и (2)), необходимых для корректного выбора и настройки элементов ЭС.» [7]

$$P_c = K_{\text{и}} \cdot P_{\text{н}}, \quad (1)$$

$$Q_c = K_{\text{и}} \cdot P_{\text{н}} \cdot \text{tg } \varphi. \quad (2)$$

где P_c – активная мощность цеха, кВт;

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

$P_{\text{н}}$ – суммарная активная мощность цеха, кВт;

Q_c – реактивная мощность цеха, квар;

$\text{tg } \varphi$ – коэффициенты реактивной мощности до и после компенсации.

«Для точности расчетов и обоснованности выбора оборудования. Расчет расчетного коэффициента будет произведен, с использованием справочных данных, по следующей формуле:» [3]

$$K_p = f(K_{\text{И}}; n_{\text{Э}}) \quad (3)$$

где K_p – расчетный коэффициент;

$n_{\text{Э}}$ – количество ЭП.

Далее находим расчетные активную и реактивную мощности по формулам:

$$P_p = K_p \cdot P_c, \quad (4)$$

$$Q_p = 1,1 \cdot Q_c \text{ при } n_{\text{Э}} \leq 10, \quad (5)$$

$$Q_p = Q_c \text{ при } n_{\text{Э}} > 10. \quad (6)$$

где P_p – расчетная активная мощность цеха, кВт;

Q_p – расчетная реактивная мощность цеха, квар.

Полную расчетную мощность рассчитываем по формуле:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} \quad (7)$$

где S_p – расчетная полная мощность цеха, кВА.

«После определения расчетных электрических нагрузок, полученные данные подвергаются детальному анализу, направленному на оценку общей нагрузки на напряжении 0,4 кВ, характерной для электроприемников предприятия по производству авиационной техники.» [1] На основе полученных значений общей «мощности, определяются коэффициент использования и коэффициент мощности ($\text{tg } \varphi$) для всей низковольтной нагрузки предприятия, используя следующие формулы:

$$K_{\text{и}} = \frac{\sum P_{\text{с}}}{\sum P_{\text{н}}}, \quad (8)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sum Q_{\text{с}}}{\sum P_{\text{с}}}. \quad (9)$$

Суммарная полная мощность определим по формуле:

$$\sum S_{\text{р}} = \sqrt{\sum P_{\text{р}}^2 + \sum Q_{\text{р}}^2} \quad (10)$$

Для обеспечения электроснабжения предприятия по производству авиационной техники на напряжении 10 кВ, осуществляется анализ высоковольтной нагрузки, определяющей ключевые параметры системы электроснабжения.» [5]

Первым этапом является определение общей номинальной мощности высоковольтной нагрузки, учитывающей суммарную мощность отдельных высоковольтных электроприемников, при этом количество электроприемников принимается с учетом их эффективного использования, в отличие от расчетов на 0,4 кВ.

После определения номинальных нагрузок, следующим этапом является расчет среднесменных нагрузок на напряжении 10 кВ.

Этот процесс включает в себя итоговый расчет высоковольтной нагрузки, определяющий общую электрическую нагрузку.

$$P_{\text{р}} = K_0 \cdot P_{\text{с}}, \quad (11)$$

$$Q_{\text{р}} = K_0 \cdot Q_{\text{с}}. \quad (12).$$

В последнюю очередь выполняется суммирование расчетных нагрузок. Итоговые данные сведены в таблицу 3 для дальнейшего использования при выборе электрооборудования.

Таблица 3 – Результаты расчета нагрузок по предприятию

№ цеха на плане завода	Название цеха	P _н , кВт	n _э	ΣP _н , кВт	K _и	cos φ	tg φ	P _с , кВт	Q _с , квар	K _р / K _о	P _р , кВт	Q _р , квар	S _р , кВА
Нагрузка 0,4 кВ													
1	Сборочный цех	-	107	3670	0,4	0,8	0,75	1468	1101,00	0,7	1027,6	1101,00	1506,04
2	Прессовой цех	-	301	11206	0,65	0,8	0,75	7283,9	5462,93	0,8	5827,12	5462,93	7987,42
3	Цех шасси	-	281	8311	0,5	0,8	0,75	4155,5	3116,63	0,75	3116,62	3116,63	4407,57
4	Заводоуправление	-	22	1,52	0,5	0,8	0,75	0,76	0,57	0,85	0,646	0,57	0,86
5	Моторный цех № 1	-	240	4447	0,4	0,8	0,75	1778,8	1334,10	0,7	1245,16	1334,10	1824,90
6	Моторный цех № 2	-	137	3313	0,4	0,8	0,75	1325,2	993,90	0,7	927,64	993,90	1359,54
7	Литейный цех № 1	-	72	4737	0,65	0,8	0,75	3079,05	2309,29	0,8	2463,24	2309,29	3376,44
8	Литейный цех № 2	-	154	8224	0,65	0,8	0,75	5345,6	4009,20	0,8	4276,48	4009,20	5861,91
9	Литейный цех № 3	-	150	7884	0,65	0,8	0,75	5124,6	3843,45	0,8	4099,68	3843,45	5619,56
10	Ремонтно-механический цех	-	32	871	0,4	0,8	0,75	348,4	261,30	0,75	261,3	261,30	369,53
11	Компрессорно-насосная станция	-	18	401	0,8	0,8	0,75	320,8	240,60	0,9	288,72	240,60	375,83
Итого		-	1514	53065	0,57	-	0,75	30230,61	22672,96	-	23534,21	22672,96	32679,08
Нагрузка 10 кВ													
7	Литейный цех № 1	250	2	500	0,65	0,8	0,75	325	243,75	-	-	-	-
8	Литейный цех № 2	1250	3	3750	0,65	0,8	0,75	2437,5	1828,125	-	-	-	-
9	Литейный цех № 3	630	5	3150	0,65	0,8	0,75	2047,5	1535,62	-	-	-	-
Итого		-	10	7400	0,65	-	0,75	4810	3607,5	0,9	4329	3246,75	5411,25
Вся нагрузка													
Итого		-	152	60465	0,58	-	0,75	35040,61	26280,6	-	27863,2	25919,7	38090,3

В представленной таблице сведены результаты расчета электрических нагрузок по предприятию. Исходные расчетные значения были скорректированы с учетом анализа фактического режима работы оборудования и уточненных данных о технологических процессах. Полученные значения были сопоставлены с допустимыми нагрузками для существующих и планируемых элементов системы электроснабжения.

Вывод:

В результате тщательных расчетов были определены ожидаемые электрические нагрузки, которые станут основой для проектирования системы электроснабжения предприятия. Эти данные позволят выбрать оборудование и схемы, обеспечивающие стабильное и эффективное энергоснабжение производственных процессов.

3 Выбор типа, числа и мощности трансформаторов цеховых ПС

«Количество трансформаторов и линий электропитания зависит от категории надежности, которая определяется в зависимости от потребителей.

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

При расчете номинальной мощности трансформаторов учитывается расчетная нагрузка, часы максимальной нагрузки и перспективы развития предприятия. Также перед определением мощности трансформаторов важно выбрать установки компенсации реактивной мощности.

Для этого необходимо изучить план предприятия, определить расположение цехов и их нагрузку, чтобы оптимизировать подстанции для совместного питания.» [3]

«Рассмотрим расположение цехов:

- цех 1 «Сборочный цех»: Цех расположен отдельно, то и ПС будет одна и только для него;
- цех 2 «Прессовой цех», 3 «Цех шасси», 5 «Моторный цех № 1», 7 «Литейный цех № 1», 8 «Литейный цех № 2», 11 «Компрессорно-насосная станция»: Тут тоже самое, что и с цехом 1.

Рассмотрим совместно стоящие цеха:

- цех 4 «Заводоуправление» и 6 «Моторный цех № 2»: имеют небольшие нагрузки, а значит, для них нужно рассчитать общую цеховую ПС;
- цеха 9 «Литейный цех № 3», 10 «Ремонтно-механический цех»: 9 цех уже имеет большую нагрузку и желательно рассчитать для него отдельную цеховую ПС, но так как рядом с ним располагается цех 10, который имеет маленькую нагрузку, то придется рассчитать для них общую цеховую ПС.

Определим категорию надежности цеха из собственных предположений.» [9]

Необходимо рассчитать мощность компенсирующих установок на напряжение 0,4 кВ по формуле:

$$Q_{к.р} = \alpha \cdot P_p \cdot (tg \varphi - tg \varphi_{к.р}) \quad (13)$$

где $Q_{к.р}$ – расчетная мощность КУ, квар;

α – коэффициент, учитывающий повышение $\cos \varphi$ естественным способом, принимается $\alpha = 0,9$;

P_p – расчетная активная мощность цеха, кВт;

$tg \varphi, tg \varphi_{к.р}$ – коэффициенты реактивной мощности до и после компенсации.

«Компенсацию реактивной мощности по опыту эксплуатации должна находиться в диапазоне $tg \varphi_k = 0,33 \dots 0,48$.

Расчетная полная мощность цеха с учетом компенсации рассчитывается по формуле:» [5]

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + (Q_p - Q_{к.р})^2} \quad (14)$$

Определим плотность электрической нагрузки цеха. Для цехов большой мощности определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{S_p}{F_{ц}} \quad (15)$$

где σ – плотность электрической нагрузки цеха(-ов), кВА / м²;

$F_{ц}$ – площадь цеха(-ов), м².

Далее рассчитывается мощность цеховых трансформаторов по формуле:

$$S_T \geq \frac{S_p}{K_3 \cdot N_T} \quad (16)$$

где S_T – полная мощность одного трансформатора, кВА;

K_3 – коэффициент загрузки трансформатора;

N_T – количество трансформаторов в цеховой ПС.

«Выбранная расчетная мощность трансформатора подлежит округлению до ближайшего значения, соответствующего стандартному ряду мощностей, установленному ГОСТ 11920-85 и ГОСТ 12965-85. Это обусловлено тем, что трансформаторы выпускаются с фиксированными значениями мощности, определяемыми стандартами, что обеспечивает унификацию и взаимозаменяемость оборудования. Стандартизированное значение мощности необходимо для последующего пересчета и представления в таблице 4.» [7]

Таблица 4 – Результаты расчетов выбора цеховых трансформаторов и КУ

№ цеха на плане завода	Наименование цехов предприятия	Категор ия надежн ости	$F_{ц}, м^2$	$\beta,$ кВА/м ²	P_p , кВт	$Q_{p.к},$ квар	$Q_p,$ квар	S_p , кВА	Принято к установке		
									КУ	$S_{н.т},$ кВА	$n_T /$ $n_{ку}$
1	Сборочный цех	2	5950	0,21	1027,60	400	701,00	1243,93	АУКРМ-200 0,4	1000	2
2	Прессовой цех	2	15800	0,42	5827,12	2200	3262,9	6678,47	АУКРМ-1100 0,4	2500	2
3	Цех шасси	2	13375	0,27	3116,63	1200	1916,6	3658,80	АУКРМ-600 0,4	1600	2
5	Моторный цех № 1	2	3150	0,48	1245,16	475	859,10	1512,77	АУКРМ-240 0,4	1000	2
7	Литейный цех № 1	1	5850	0,48	2463,24	950	1359,2	2813,40	АУКРМ-475 0,4	2500	2
8	Литейный цех № 2	1	6175	0,79	4276,48	1600	2409,2	4908,41	АУКРМ-800 0,4	2500	2
11	Компрессорно-насосная станция	2	1750	0,18	288,72	110	130,60	316,88	АУКРМ-55 0,4	250	2
4	Заводоуправление	3	8750	0,13	928,29	350	644,47	1130,07	АУКРМ-175 0,4	630	2
6	Моторный цех № 2	2									
9	Литейный цех № 3	1	10600	0,47	4360,98	1600	2504,7	5029,11	АУКРМ-800 0,4	2500	2
10	Ремонтно-механический цех	1									
Суммарная полная мощность цехов, $\sum S_p$, кВА:								27291,85			

Вывод:

Определены категории надежности цехов, часть из которых объединены в группы. Выбраны число и мощности каждой ПС, а также компенсирующие устройства для них.

4 Определение местоположения ГПП

Данные расчеты нужны для определения наиболее целесообразного расположения главной понизительной подстанции.

Для начала составим таблицу 5 со всеми девятью цеховыми ТП.

Таблица 5 – Данные по мощностям цеховых ТП

Название цехового ТП	Ц1	Ц2	Ц3	Ц4	Ц5	Ц6	Ц7
Номера цехов подключенных к данному цеховым ТП	1	2	3	5	7	8	11
P_p , кВт	1027,6	5827,1	3116,6	1245,1	2463,2	4276,8	288,72
Q_p , квар	701,00	3262,9	1916,6	859,10	1359,2	2409,2	130,60
Название цехового ТП	Ц8	Ц9					
Номера цехов подключенных к данному цеховым ТП	4, 6	9, 10					
P_p , кВт	928,29	4360,9					
Q_p , квар	644,47	2504,7					

Для начала нанесем генплан предприятия на картограмму с осями X и Y.

Масштаб равен $m_r = 35$ м/см.

«Разместим подстанции цехов так, чтобы они были наиболее близко к месту поступления электропитания, при этом они должны находиться в пределах соответствующих цехов. Если несколько цехов подключены к одной подстанции, то она должна быть размещена так, чтобы расстояние до каждого цеха было примерно одинаковым.

Размер цеховых ТП равен 10×10 метров.

После этого нужно определить координаты X и Y каждой цеховой ТП.

Определим радиусы активных и реактивных нагрузок.» [4] Принимаем для наименьшей нагрузки радиус $R_{A7} = 18$ м., тогда:

$$m_a = \frac{P_{p7}}{\pi R_{A7}^2} = \frac{288,72}{3,14 * 18^2} = 0,28 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2} \quad (17)$$

где m_a – количество мощности на квадратный метр, кВт/м².

«Принимается $m_a = 0,28$ кВт/м².

Определяется радиус для наибольшей нагрузки цеховых ТП:

$$R_{A2} = \sqrt{\frac{P_{p2}}{\pi m_a}} = \sqrt{\frac{5827,12}{3,14 * 0,28}} = 81,39 \text{ м} \quad (18)$$

Все укладывается в масштабы, а значит, значения выбраны верно.
Досчитаем радиусы для остальных цехов.

Примем $m_p = 0,28$ квар/м² и рассчитаем радиусы реактивных мощностей по формуле:

$$R_{pi} = \sqrt{\frac{Q_{pi}}{\pi m_p}} \quad (19)$$

Занесем все значения в таблицу 6.

Таблица 6 – Данные по радиусам мощностей цеховых ТП» [9]

Название цехового ТП	Ц1	Ц2	Ц3	Ц4	Ц5	Ц6	Ц7	Ц8	Ц9
X, м	267,57	229,62	267,02	230,84	230,84	268,14	148,4	268,14	263,14
Y, м	542,95	365,16	361,02	276,61	172,47	212,47	68,43	276,61	135,93
P_p , кВт	1027,6	5827,12	3116,6	1245,16	2463,24	4276,48	288,72	928,29	4360,98
R_A , м	33,96	80,87	59,14	37,38	52,58	69,28	18	32,28	69,96
Q_p , квар	701	3262,93	1916,6	859,1	1359,29	2409,2	130,6	644,47	2504,75
R_p , м	28,05	60,51	46,38	31,05	39,06	52	12,11	26,89	53,02

Теперь определяются условные центр электрических нагрузок (ЦЭН) активной и реактивной:

$$X_{a0} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot X_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = \frac{5887229,18}{23534,22} = 250,16 \text{ м}, \quad (20)$$

$$Y_{a0} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = \frac{6358134,16}{23534,22} = 270,17 \text{ м}, \quad (21)$$

$$X_{p0} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot X_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} = \frac{3457964,28}{13787,97} = 250,8 \text{ м}, \quad (22)$$

$$Y_{p0} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} = \frac{3775670,82}{13787,97} = 273,84 \text{ м}. \quad (23)$$

На рисунке 2 представлен генеральный план предприятия с указанием центров расположения цеховых трансформаторных подстанций (ТП). Вокруг каждой ТП изображены окружности, радиусы которых пропорциональны значениям активной и реактивной нагрузок, питаемым от данной подстанции. Данное графическое представление позволяет наглядно оценить распределение электрических нагрузок по территории предприятия и определить зоны ответственности каждой ТП.

Вблизи точки А располагается ГПП.

Вблизи точки В располагается комплектная конденсаторная установка (ККУ) или синхронный компенсатор (СК).

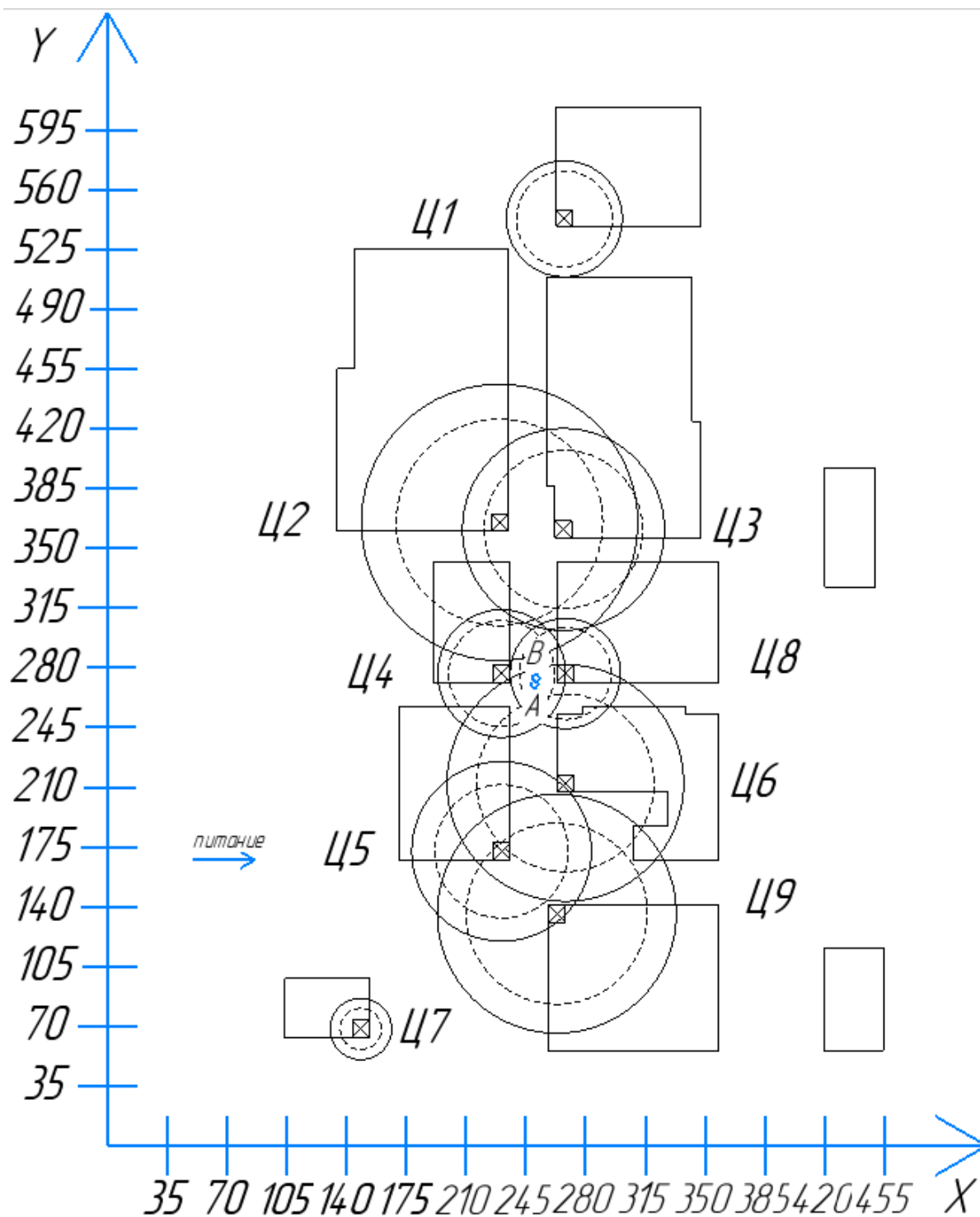


Рисунок 2 – Картограмма нагрузок

Вывод:

Определены центр нагрузок и местоположение ГПП.

5 Выбор типа, числа и мощности трансформаторов ГПП

«Выбор напряжения питания на промышленном предприятии определяется напряжением доступного источника энергии, расстоянием от подстанции до предприятия, возможностью размещения высоковольтных воздушных и кабельных линий электропередачи, окружающей средой и другими факторами.» [8]

«Определим сначала активные потери на цеховых трансформаторах с помощью следующей формулы:

$$\Delta P_T = \sum S_p \cdot 0,02, \quad (24)$$

$$\Delta P_T = 27291,85 \cdot 0,02 = 545,84 \text{ кВт.} \quad (25)$$

Суммарная активная мощность по всему предприятию рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{рп}} = P_{\text{рн}} + P_{\text{рв}} + \Delta P_T, \quad (26)$$

$$P_{\text{рп}} = 23534,21 + 4329 + 545,84 = 28409,05 \text{ кВт.} \quad (27)$$

Определим величину рационального напряжения,» [5] которую определим по формуле:

$$U_{\text{рац}} = 4,34 \cdot \sqrt{L + 0,016 \cdot P_{\text{рп}}}, \quad (28)$$

$$U_{\text{рац}} = 4,34 \cdot \sqrt{18 + 0,016 \cdot 28409,05} = 94,34 \text{ кВ.} \quad (29)$$

«Согласно расчетам, питающее напряжение будет равно 110 кВ.

Далее найдем экономически целесообразную реактивную мощность, на стороне ВН ГПП по формуле:» [13]

$$Q_{\text{эс}} = P_{\text{рн}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\text{эс}}, \quad (30)$$

$$Q_{\text{эс}} = 28409,05 \cdot 0,54 = 15340,89 \text{ квар.} \quad (31)$$

Определим значение полной расчетной мощности промышленного предприятия по формуле:

$$S_{\text{рп}} = \sqrt{P_{\text{рп}}^2 + Q_{\text{эс}}^2}, \quad (32)$$

$$S_{\text{рп}} = \sqrt{28409,05^2 + 15340,89^2} = 32286,48 \text{ кВА}. \quad (33)$$

Номинальную мощность трансформаторов на ГПП найдем по формуле:

$$S_{\text{т}} \geq \frac{S_{\text{р}} \cdot K_{1-2}}{K_{\text{пер}}}, \quad (34)$$

$$S_{\text{т}} \geq \frac{32286,48 \cdot 0,8}{1,4} = 18449,42 \text{ кВА}. \quad (35)$$

«Выбираем для установки на ГПП предприятия 2 трансформатора ТМН-25000/110/10.

Вывод:

Выбраны трансформаторы ТМН-25000/110/10 для ГПП.» [15]

6 Расчет токов коротких замыканий

«В данном разделе нужно найти ток 3-фазного КЗ на низкой стороне трансформатора.

Изобразим сначала расчетную схему (рисунок 3) и схему замещения (рисунок 4).» [6]

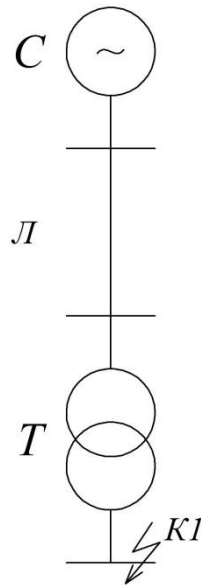


Рисунок 3 – Расчетная схема

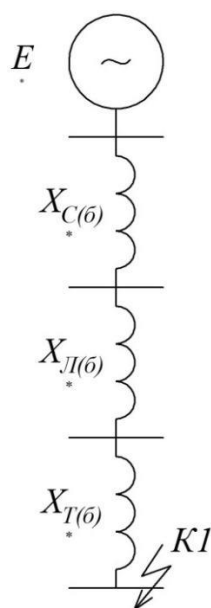


Рисунок 4 – Схема замещения

«Паспортные данные занесены в таблицу 7.

Таблица 7 – Паспортные данные трансформатора

Тип	S _н , МВА	Каталожные данные				
		U _{ном} , кВ		U _к , %	P _к , кВт	P _х , кВт
		ВН	НН			
ТМН-25000/110/10	25	115	10,5	10,5	140	31

Дополнительные данные» [7] для расчёта:

$$S_6 = 10000 \text{ МВА}; U_6 = 10,5 \text{ кВ}; S_K = 860 \text{ МВА}, \quad (36)$$

$$k_{уд} = 1,85; l = 18 \text{ км}; x_0 = 0,4 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}. \quad (37)$$

Сопротивления системы рассчитывается по формуле:

$$x_{*C(6)} = \frac{S_6}{S_K} = \frac{10000}{860} = 11,63 \text{ о. е.} \quad (38)$$

Сопротивления линии рассчитывается по формуле:

$$x_{*Л(6)} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_6^2} = 0,4 \cdot 18 \cdot \frac{10000}{115^2} = 5,44 \text{ о. е.} \quad (39)$$

Сопротивление трансформатора рассчитывается по формуле:

$$x_{*Т(6)} = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{10000}{25} = 42 \text{ о. е.} \quad (40)$$

Рассчитаем полное сопротивление, а затем токи КЗ:

$$x_{K1} = x_{*C(6)} + x_{*Т(6)} = 11,63 + 5,44 + 42 = 59,07 \text{ о. е.}, \quad (41)$$

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 549,86 \text{ кА}, \quad (42)$$

$$I_{П,0} = \frac{E''_C}{x_{рез,К1}} \cdot I_6 = \frac{1}{59,07} \cdot 549,86 = 9,31 \text{ кА}, \quad (43)$$

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot I_{П,0} \cdot k_{уд} = \sqrt{2} \cdot 9,31 \cdot 1,85 = 24,35 \text{ кА}. \quad (44)$$

Результаты занесены в таблицу 8.

Таблица 8 – Данные трансформатора

Точка	Ударный ток	Периодическая составляющая тока КЗ
К1	24,35 кА	9,31 кА

Вывод:

Произведен расчет токов короткого замыкания.

7 Выбор и проверка оборудования на стороне 10 кВ ГПП

«Для напряжений 10 кВ можно использовать КРУ. Выберем одно из таких, это КРУ-СЭЩ-70.

Перечень измерительных приборов, уставляемых на ПС, приведен в таблице 9.

Таблица 9 – Перечень измерительных приборов

Цепь	Место установки	Перечень приборов
Двухобмоточный трансформатор	ВН	Амперметр
	НН	Амперметр, ваттметр, варметр, счетчики активной и реактивной энергии
Сборные шины 10 кВ	Каждая секция сборных шин	Вольтметр
Секционный выключатель	-	Амперметр
Линии 10 кВ к ТП	Каждая линия	Амперметр, счетчики активной и реактивной энергии
Трансформатор собственных нужд	ВН	-
	НН	Амперметр, счетчики активной энергии

Данные по КРУ записываются в таблицу 10.

Таблица 10 – Данные по оборудованию КРУ

Тип ячейки	
Параметр	Значение
Номинальное напряжение, кВ	10
Тип выключателя	ВВУ-СЭЩ-ПЗ-10-20/1600
Тип трансформатора напряжения	НАЛИ-СЭЩ-10-1-0,5-225
Тип трансформатора тока	ТОЛ-СЭЩ-10-0,2S-1500/5

Проверяем вакуумный выключатель» [14] ВВУ-СЭЩ-ПЗ-10-20/1600.

Номинальное напряжение:

$$U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ} \leq U_{\text{сет.ном}} = 10 \text{ кВ} \quad (45)$$

Номинальный рабочий ток:

$$I_{\text{раб}} = \frac{S_T}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н}}} = \frac{25000}{\sqrt{3} \cdot 10} = 1443,38 \text{ А}, \quad (46)$$

$$I_{\text{раб}} = 1443,38 \text{ А} \leq I_{\text{ном}} = 1600 \text{ А}. \quad (47)$$

Симметричный ток:

$$I_{\text{п},\tau} = I_{\text{п},0} = 9,31 \text{ кА}, \quad (48)$$

$$I_{\text{п},\tau} = 9,31 \text{ кА} \leq I_{\text{откл.ном}} = 20 \text{ кА}. \quad (49)$$

Апериодическая составляющая тока:

$$\tau = t_{\text{рз}} + t_{\text{с.в.}} = 0,01 + 0,03 = 0,04 \text{ с}, \quad (50)$$

$$I_{\text{а},\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{п},\tau} \cdot e^{-\frac{\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 9,31 \cdot e^{-\frac{0,04}{0,03}} = 3,47 \text{ кА}, \quad (51)$$

$$I_{\text{а,ном}} = \left(\frac{\sqrt{2} \cdot \beta_{\text{нор}}}{100} \right) \cdot I_{\text{откл.ном}} = \left(\frac{\sqrt{2} \cdot 40}{100} \right) \cdot 20 = 11,31 \text{ кА}, \quad (52)$$

$$I_{\text{а},\tau} = 3,47 \text{ кА} \leq I_{\text{а,ном}} = 11,31 \text{ кА}. \quad (53)$$

«Включающая способность:

$$I_{\text{п},0} = 9,31 \text{ кА} \leq I_{\text{вкл.ном}} = 20 \text{ кА}, \quad (54)$$

$$i_{\text{уд}} = 24,35 \text{ кА} \leq i_{\text{вкл.ном}} = 50 \text{ кА}. \quad (55)$$

Электродинамическая стойкость:

$$I_{\text{п},0} = 9,31 \text{ кА} \leq I_{\text{пр.с}} = 20 \text{ кА}, \quad (56)$$

$$i_{\text{уд}} = 24,35 \text{ кА} \leq i_{\text{пр.с}} = 50 \text{ кА}. \quad (57)$$

Термическая стойкость:

$$t_{\text{откл}} = t_{\text{рз}} + t_{\text{пв.откл}} = 0,01 + 0,05 = 0,06 \text{ с}, \quad (58)$$

$$B_K = I_{п,0}^2 \cdot (t_{откл} + T_a) = (9,31 \cdot 10^3)^2 \cdot (0,06 + 0,03) = 7,80 \cdot 10^6 A^2 \cdot c, \quad (59)$$

$$\text{Если } t_{откл} \geq t_T, \text{ то } B_K \leq I_T^2 \cdot t_T, \quad (60)$$

$$\text{Если } t_{откл} \leq t_T, \text{ то } B_K \leq I_T^2 \cdot t_{откл}, \quad (61)$$

$$t_{откл} = 0,06 \text{ с} \leq t_T = 3 \text{ с}, \quad (62)$$

$$I_T^2 \cdot t_{откл} = (50 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,06 = 150 \cdot 10^6 A^2 \cdot c, \quad (63)$$

$$B_K = 7,80 \cdot 10^6 A^2 \cdot c \leq I_T^2 \cdot t_{откл} = 150 \cdot 10^6 A^2 \cdot c. \quad (64)$$

Все условия выполняются, а значит, данный выключатель прошел проверку.

Теперь проверим трансформатор тока ТОЛ-СЭЩ-10-0,2S-1500/5.

Номинальное напряжение:

$$U_{ном} = 10 \text{ кВ} \leq U_{сет.ном} = 10 \text{ кВ} \quad (65)$$

Номинальный рабочий ток:

$$I_{раб} = 1443,38 \text{ А} \leq I_{1ном} = 1500 \text{ А} \quad (66)$$

Термическая стойкость:» [16]

$$t_{откл} = 0,06 \text{ с}; B_K = 7,80 \cdot 10^6 A^2 \cdot c, \quad (67)$$

$$\text{Если } t_{откл} \geq t_T, \text{ то } B_K \leq I_T^2 \cdot t_T, \quad (68)$$

$$\text{Если } t_{откл} \leq t_T, \text{ то } B_K \leq I_T^2 \cdot t_{откл}, \quad (69)$$

$$t_{откл} = 0,06 \text{ с} \leq t_T = 3 \text{ с}, \quad (70)$$

$$I_T^2 \cdot t_{откл} = (40 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,06 = 96 \cdot 10^6 A^2 \cdot c, \quad (71)$$

$$B_K = 7,80 \cdot 10^6 A^2 \cdot c \leq I_T^2 \cdot t_{откл} = 96 \cdot 10^6 A^2 \cdot c. \quad (72)$$

Вторичная нагрузка:

$$Z_{2ном} = \frac{S_2}{I_2^2} = \frac{50}{5^2} = 2 \text{ Ом} \quad (73)$$

«Заполним таблицу (таблица 11) с измерительными приборами, подключаемые к вторичной обмотке трансформатора тока.

Нагрузка вторичных обмоток необходимая для ТТ выбирается исходя из одной ячейки.» [18]

Таблица 11 – Измерительные приборы, подключенные к ТТ

Тип прибора	Название прибора	n, кол.	S _{приб} , ВА	S _Σ , ВА
Амперметр	ЩМ120	1	15	15
Ваттметр				
Счетчики активной энергии и реактивной энергии	ЩМК120СП	1	10	10
Суммарное значение полной мощности всех приборов				25

Так как во вторичной цепи будет больше одного устройства, то сопротивление контактов примем равной $R_K = 0,1 \text{ Ом}$

$$R_{\text{приб}} = \frac{S_{\Sigma}}{I_2^2} = \frac{25}{5^2} = 1 \text{ Ом} \quad (74)$$

$$R_{\text{пр}} \leq Z_{2\text{НОМ}} - R_{\text{приб}} - R_K = 2 - 1 - 0,1 = 0,9 \text{ Ом} \quad (75)$$

«Расчетная длина проводов вторичной обмотки зависит от схемы соединения. Как правило, используется полная звезда, а значит $l_p = l$.

Для 10 кВ, длина вторичных цепей находится в диапазоне 4...6 м.

Удельное сопротивление равно $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$, так как жила будет из меди.» [12]

$$s = \frac{\rho \cdot l_p}{R_{\text{пр}}} = \frac{0,0175 \cdot 6}{0,9} = 0,12 \text{ мм}^2 \quad (76)$$

«Минимальное сечение для медных проводов равно $2,5 \text{ мм}^2$. Поэтому выбираем именно такое.

Проверяем трансформатор напряжения.

Теперь проверим трёхфазный трансформатор напряжения НАЛИ-СЭЩ-10-1-0,5-225.» [10]

Номинальное напряжение:

$$U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ} \leq U_{\text{сет.ном}} = 10 \text{ кВ} \quad (77)$$

«Вторичная нагрузка:

Заполним таблицу (таблица 12) с измерительными приборами, подключаемые к вторичной обмотке трансформатора напряжения.

Нагрузка вторичных обмоток ТН выбираем исходя из всей шины.

Таблица 12 – Измерительные приборы, подключенные к ТН

Тип прибора	Название прибора	$\cos \varphi$	$\sin \varphi$	$n_{\text{приб, кол.}}$	$n_{\text{кат, кол.}}$	$S_{\text{кат, ВА}}$	$S_{\Sigma, \text{ ВА}}$
Вольтметр	ЦМ120	1	0	2	-	-	30
Ваттметр							
Счетчики активной энергии и реактивной энергии	ЦМК120СП	0,38	0,925	9	-	-	90

$$S_{\text{ном}} = 225 \text{ ВА}, \quad (78)$$

$$S_{2\Sigma} = \sqrt{(\sum S_{\text{приб}} \cdot \cos \varphi)^2 + (\sum S_{\text{приб}} \cdot \sin \varphi)^2} =$$

$$= \sqrt{(30 + 90 \cdot 0,38)^2 + (\sum 90 \cdot 0,925)^2} = 106 \text{ ВА}, \quad (79)$$

$$S_{\text{ном}} = 225 \text{ ВА} \geq S_{2\Sigma} = 106 \text{ ВА}. \quad (80)$$

Данные, полученные из формул, идеально согласуются с необходимыми параметрами благодаря правильному применению самих формул, точной обработке исходных значений и строгому соблюдению всех условий и ограничений задачи. Это позволяет уверенно применять полученные результаты в дальнейших расчетах и решениях, гарантируя полное соответствие установленным стандартам и техническим требованиям.

Параметры выбранного трансформатора напряжения сводятся» [11] в таблицу 13.

Таблицу 13 – Параметры выбранного трансформатора напряжения

Параметр	Значение
Номинальное напряжение обмотки, В: ВН НН	$10000 / \sqrt{3}$ $100 / \sqrt{3}$
Вторичная нагрузка, ВА: расчетная $S_{2\Sigma}$ $S_{\text{ном}}$	106 225
Класс точности	0,5

Вывод:

Выбраны и проверено оборудование на стороне 10 кВ ГПП.

8 Расчет освещения производственного цеха

В данном разделе производится расчет нагрузок сетей освещения производственного корпуса, цеха 5 «Моторный цех № 1». Он необходим для определения расчетной нагрузки.

«Осветительные установки выполняются по системе либо общего, при котором светильники размещаются в верхней зоне помещения равномерно, либо комбинированного освещения, когда к общему еще добавляется местное освещение, дополнительное, создаваемое светильниками непосредственно на рабочих местах. Система общего освещения применяется в производственных помещениях с невысоким уровнем освещенности (до 200 лк). В помещениях с I-III, IVa, IVб, Va разрядами работ следует применять систему комбинированного освещения.» [17] Предусматривать для них систему общего освещения допускается при технической невозможности или нецелесообразности устройства местного освещения.

«Система искусственного освещения включает в себя несколько типов освещения, каждый из которых выполняет определённые функции (рисунок 5).

Рабочее освещение предназначено для обеспечения нормального уровня освещённости в помещениях и на рабочих местах. Оно используется в течение всего рабочего времени.» [17]

Аварийное освещение включается в случае отключения основного источника питания. Оно обеспечивает минимальную освещённость для безопасного завершения работы или эвакуации.

Дежурное освещение используется в нерабочее время для поддержания минимальной освещённости в помещениях.

«Архитектурное освещение применяется для подсветки зданий, фасадов и других архитектурных элементов, создавая эстетический эффект.

Эвакуационное освещение – обеспечивает безопасный выход людей из здания в случае чрезвычайной ситуации. Оно должно быть достаточно ярким и видимым даже при отключении основного освещения.

Резервное освещение – используется как дополнительный источник света в случае неисправности основного освещения.» [19]



Рисунок 5 – Типы искусственного освещения

«С учетом специфики помещений цеха, будут применены рабочее, аварийное и эвакуационное освещение. В качестве дежурного освещения будут применены светильники рабочего освещения.

Неравномерность освещенности E_{max}/E_{min} в зоне размещения рабочих мест» [5] для работ I—III разрядов при люминесцентных лампах должна быть

не более 1,3, при других источниках света - 1,5; для работ разрядов IV-VII - 1,5 и 2,0 соответственно.

Неравномерность освещенности допускается повышать до трех в тех случаях, когда по условиям технологии светильники общего освещения могут устанавливаться только на площадках, колоннах или стенах помещения.

В производственных помещениях освещенность проходов и участков, где работа не производится, должна составлять не менее 25 % освещенности, создаваемой светильниками общего освещения.

«Выбираем систему общего освещения с равномерным расположением светильников в верхней зоне помещения.

Выбор типа источника производится исходя из его экономичности (большая световая отдача при большем или том же сроке службы), правильной передачи цветов освещаемых объектов (там, где это важно) и удобства эксплуатации. Правильная передача цветов обеспечивается цветопередачей,» [18] характеризующей влияние спектрального состава источника света на зрительное восприятие цветных объектов, сознательно или бессознательно сравниваемое с восприятием тех же объектов, освещенных стандартным источниками света.

«Для освещения помещений, как правило, предусматриваются светодиодные лампы.

Выбор типа светильников производится с учетом требований к его светораспределению; степени защиты по условиям среды; экономичности установки в целом.

При системе общего освещения применяется равномерное и локализованное размещение светильников. При равномерном размещении обеспечивается достаточная равномерность освещенности по всей площади помещения в целом. В этом случае расстояние между светильниками в каждом ряду неизменно, расстояние между рядами берется также постоянным.

При локализованном размещении положение каждого светильника зависит от расположения оборудования. Оно применяется при

локализованном размещении станков; в специальных случаях, обусловленных требованием технологии, и, наконец, случае, если по условиям работы невозможно устройство местного освещения.» [19]

Для выбора количества светильников, требуется определить размеры помещений цеха 5 «Моторный цех № 1». «Типовые размеры представлены на рисунке 7.

Для кабинета начальника цеха, выполненного в стандартном офисном стиле, с подвесными потолками, используются светильники типа SLIM LED 595 4000 К. Внешний вид светильников представлен на рисунке 6.» [7]



Рисунок 6 – Внешний вид светильников SLIM LED 595 4000 К

Для небольших по размерам помещений с агрессивной производственной средой будут применены защищенные светильники типа Fereks FA 01-20-850. К таким помещениям относятся распределительные устройства встроенной ТП, заточная, бытовки, вентиляторные, коридор.

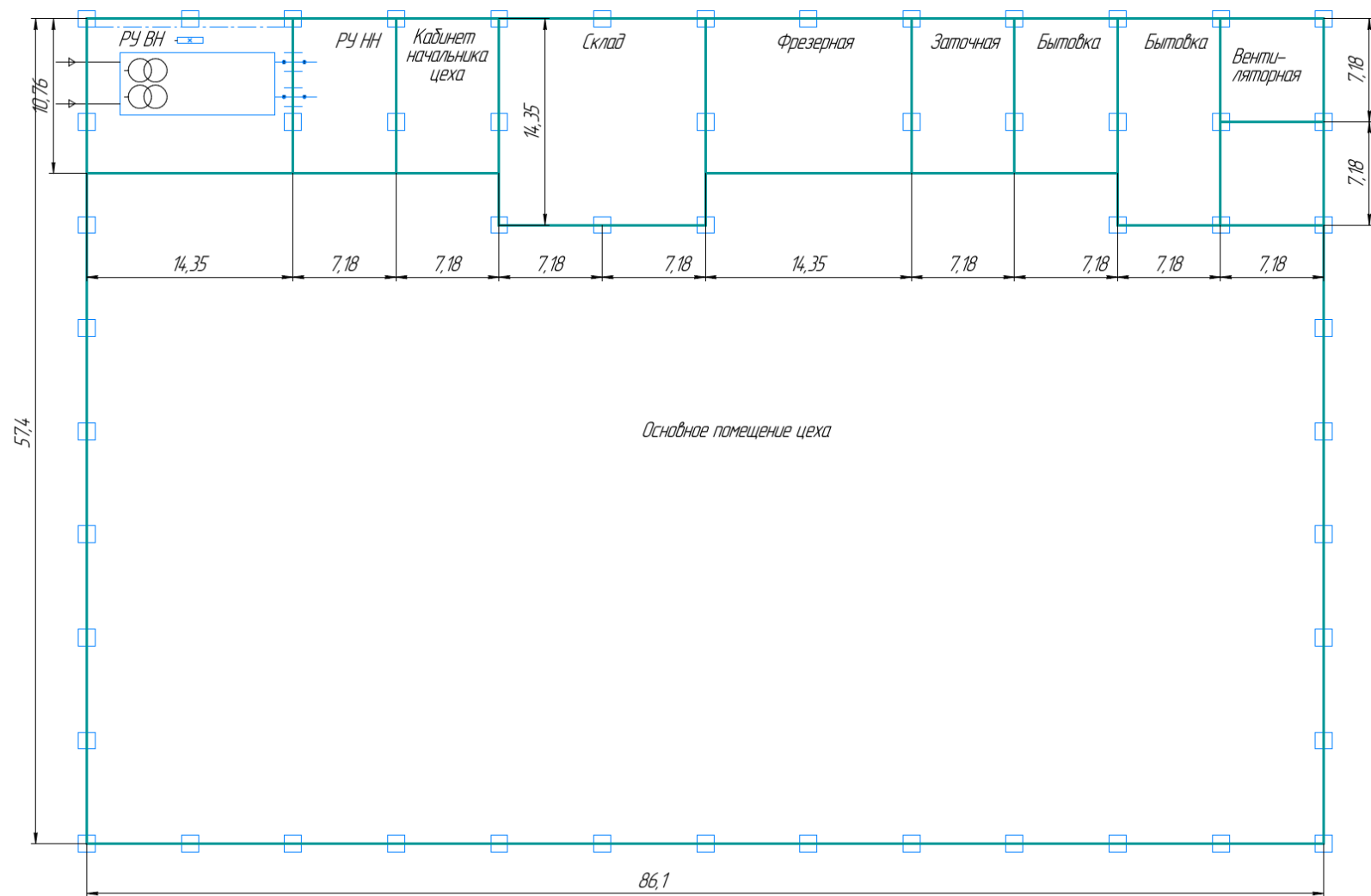


Рисунок 7 – План и размеры помещений цеха

Внешний вид данных светильников представлен на рисунке 8.



Рисунок 8 – Внешний вид светильника Fereks FA 01-20-850

Для освещения основного производственного цеха, а также для освещения больших по размерам помещений склада и фрезерной будут применены светильники типа Ферекс Ех-ДСО 01-65-850-Д120 (рисунок 9).



Рисунок 9 – Внешний вид светильника Ферекс Ех-ДСО 01-65-850-Д120

Для освещения путей эвакуации будут применены светильники марки ДБА 3928 производства ИЕК. Внешний вид светильника для освещения путей эвакуации приведен на рисунке 10. Светильник обладает временем автономной работы в 15 часов.



Рисунок 10 – Внешний вид светильника для освещения путей эвакуации марки ДБА 3928

Второй тип эвакуационных светильников – подсветка эвакуационных знаков. Для данных целей будут применены светильники ССА 2101 3Вт 3ч ВЫХОД-EXIT IP20 IEK LSSA0-2101-3-20-K03 производства IEK (рисунок 11).



Рисунок 11 – Светильник подсветки эвакуационных знаков ССА 2101 3Вт 3ч ВЫХОД-EXIT IP20 IEK LSSA0-2101-3-20-K03

«Схема системы освещения предусматривает аварийные светильники, необходимые для обеспечения наличия освещенности в случае аварийного отключения рабочего освещения.

Для питания аварийного освещения в случае пропадания основного и резервного внешнего электроснабжения предусмотрены светильники рабочего освещения с аварийными блоками.» [9]

В данной работе будут применены аварийные блоки БАП 60 Вт 4.4 Ач Li-Ion 1 ч AC 220В IP40 производства Gauss (рисунок 12).



Рисунок 12 – Внешний вид аварийных блоков

Подключение светильников в линиях освещения осуществляется с применением клеммных колодок, внешний вид которых представлен на рисунке 13.

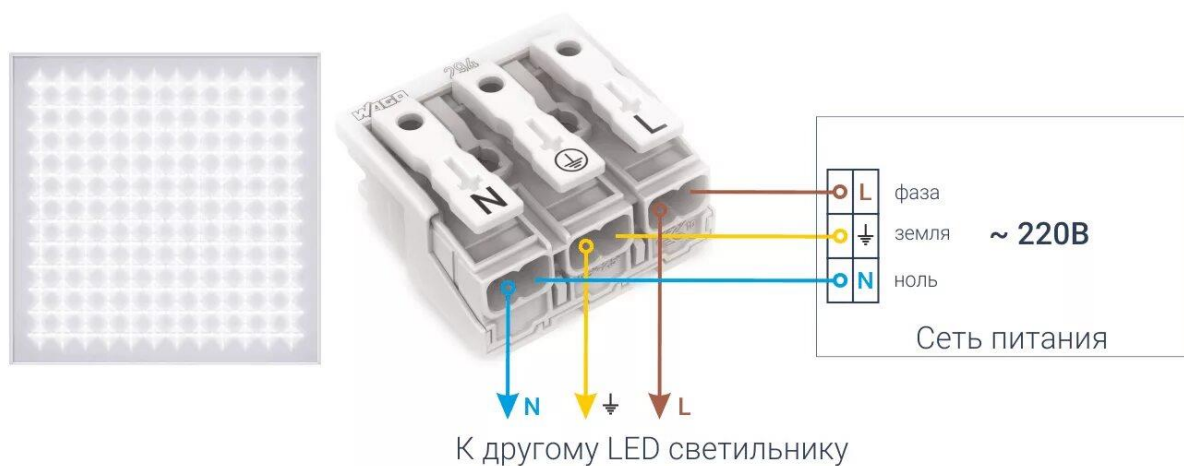


Рисунок 13 – Схема подключения светильника

Характеристики представленных выше светильников приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Паспортные данные ламп

Марка лампы	Мощность, Вт	Напряжение, В	Световой поток, лм
Ферекс Ех-ДСО 01-65-850-Д120	65	220	8190
SLIM LED 595 4000 К	40	220	3600
Ферекс FA 01-20-850	20	220	2548
ДБА 3928	12	220	5000
ССА 2101 3Вт	3	220	60

Светотехнический расчет проведем на примере основного производственного помещения.

Первоначально требуется определить значения индексов каждого помещения, поскольку значение индекса влияет на световой поток.

Индекс помещения вычисляется по следующей формуле 81:

$$\phi = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)} \quad (81)$$

где a,b – линейные размеры помещения, м;

h – высота подвеса светильников.

Для помещения основного цеха индекс помещения будет равен:

$$\phi = \frac{86,1 \cdot 46,64}{4,5 \cdot (86,1 + 46,64)} = 6,723 \quad (82)$$

Аналогично определяются индексы помещений и коэффициенты использования осветительных установок для остальных помещений. Полученные величины также вносятся в соответствующие графы таблицы. Результаты расчета сводятся в таблицу 15, где указаны наименования помещений, их геометрические характеристики, рассчитанные индексы и подобранные коэффициенты использования световых приборов.

Таблица 15 – Расчет индексов помещений и коэффициента использования осветительных установок

Наименование	A, м	B, м	H, м	S, м ²	ϕ	u_{oy}
Основное помещение цеха	86,1	46,64	4,5	4015,70	6,72	0,96
РУ ВН ТП	14,35	10,76	4,5	154,41	1,37	0,61
РУ НН ТП	10,76	7,18	3	77,26	1,44	0,62
Кабинет начальника цеха	10,76	7,18	3	77,26	1,44	0,62
Склад	14,35	14,35	3	205,92	2,39	0,68
Фрезерная	14,35	10,76	4,5	154,41	1,37	0,61
Заточная	10,76	7,18	4,5	77,26	0,96	0,52
Бытовка 1	10,76	7,18	3	77,26	1,44	0,52
Бытовка 2	14,35	7,18	3	103,03	1,60	0,56
Вентиляторная	7,18	7,18	4,5	51,55	0,80	0,49
Коридор	7,18	7,18	3	51,55	1,20	0,49

«Для того чтобы узнать мощность и число ламп в помещении нужно рассчитать световой поток требуемую на освещение всего помещения по формуле 83:

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{E_H \cdot S_p \cdot k \cdot z}{u_{oy}} \quad (83)$$

где $E_H = 200$ – нормативная освещенность помещения,

$S_p = 26 \cdot 48 - 8 \cdot 4 = 1216 \text{ м}^2$ – площадь помещения,

$K = 1,1$ – коэффициент запаса,

$z = 1,1$ – поправочный коэффициент,

$u_{oy} = 0,65$ – коэффициент использования осветительных установок, зависящий от индекса помещения ($\phi = 6,4$) и от коэффициентов отражения потолка ($\rho_n=70\%$), стен ($\rho_c=50\%$), и расчетной плоскости ($\rho_p=30\%$).» [20]

Для основного помещения цеха необходимый световой поток равен:

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{200 \cdot 4015,7 \cdot 1,1 \cdot 1,1}{0,96} = 1012292 \text{ Лм} \quad (84)$$

Результаты расчета приводятся в таблице 16.

Таблица 16 – Светотехнический расчет помещений корпуса

Название помещения	$E_{н,лк}$	$S_p, м^2$	u_{oy}	$\Phi_{\Sigma}, \text{Лм}$
Основное помещение цеха	200	4015,70	0,96	1012292
РУ ВН ТП	100	154,41	0,61	30628,08
РУ НН ТП	100	77,26	0,62	15077,54
Кабинет начальника цеха	200	77,26	0,62	30155,07
Склад	150	205,92	0,68	54963,14
Фрезерная	200	154,41	0,61	61256,15
Заточная	200	77,26	0,52	35954,13
Бытовка 1	100	77,26	0,52	17977,06
Бытовка 2	100	103,03	0,56	22262,49
Вентиляторная	100	51,55	0,49	12730,29
Коридор	100	51,55	0,49	12730,29

«Для того, чтобы узнать число ламп, обеспечивающих нормальную освещенность, нужно общий световой поток разделить на световой поток одной лампы. Выбираем лампы Ферекс Ех-ДСО 01-65-850-Д120, имеющие световой поток $\Phi_{л} = 8190$ лм, получим по формуле 85:

$$n_{\text{лампы}} = \frac{\Phi_{\Sigma}}{\Phi_{л}} \quad (85)$$

$$n_{\text{лампы}} = \frac{1012292}{8190} = 123,6$$

Для основного помещения цеха, с учетом геометрии выбирается 139 ламп.

Расчет для остальных помещений ведется аналогично, его результаты приведены в таблице 17» [21]

Таблица 17 – Расчет количества ламп

Наименование	Φ_{Σ} , Лм	$\Phi_{\text{л}}$, Лм	$n_{\text{лампы}}$	$n_{\text{факт}}$
Основное помещение цеха	1012292,05	8190	123,6	139
РУ ВН ТП	30628,08	2548	12,0	12
РУ НН ТП	15077,54	2548	5,9	6
Кабинет начальника цеха	30155,07	3600	8,4	10
Склад	54963,14	8190	6,7	9
Фрезерная	61256,15	8190	7,5	9
Заточная	35954,13	8190	4,4	6
Бытовка 1	17977,06	8190	2,2	3
Бытовка 2	22262,49	8190	2,7	3
Вентиляторная	12730,29	8190	1,6	2
Коридор	12730,29	8190	1,6	2

Вывод:

Полученные значения количества ламп позволяют обеспечить требуемые значения освещенности помещений, обеспечив комфортные и безопасные условия труда.

9 Расчет электрических нагрузок системы освещения

Для питания сети освещения необходимо разбить систему электроснабжения на группы.

Наибольшее количество ламп приходится на основное помещение цеха.

С учетом структуры размещения светильников, сеть освещения основного помещения цеха будет разделена на 7 групп.

Для обеспечения снижения количества использованной кабельно-проводниковой продукции, помещения с наименьшим количеством ламп – Бытовка 1, Бытовка 2, вентиляторная и коридор объединяются в одну группы.

Питание сети аварийного освещения выполняется двумя группами – группа №1 для питания светильников всех помещений, за исключением основного помещения цеха и группа №2 для питания светильников аварийного освещения основного помещения цеха.

Мощность каждой группы освещения определяется по формуле 86:

$$P_{\text{пит}} = K_C \cdot \sum_{i=0}^n \frac{P_{Ci} \cdot N_i}{K_{\text{КПД}i}} \quad (86)$$

где P_{Ci} – мощность одной лампы i -го вида, кВт;

N_i – количество ламп i -го вида, шт;

K_C – коэффициент спроса освещения;

$K_{\text{КПД}i}$ – коэффициент повышения мощности для светодиодного освещения вследствие применения пуско - регулирующей аппаратуры ламп i -го вида.

Мощность светильников группы №1 будет равна:

$$P_{p1} = 1 \cdot \left(\frac{0,065 \cdot 13}{0,98} \right) = 0,862 \text{ кВт} \quad (87)$$

Полная мощность каждой группы определяется по формуле (88)

$$S_{\text{рпит}} = K_C \cdot \sum_{i=0}^n \frac{P_{Ci} \cdot N_i}{K_{\text{КПД}i} \cdot \cos \varphi} \quad (88)$$

где $\cos \varphi$ – коэффициент реактивной мощности светильников.

Для группы №1 полная мощность будет равна:

$$S_{p1} = 1 \cdot \left(\frac{0,065 \cdot 13}{0,98 \cdot 0,96} \right) = 0,898 \text{ кВА} \quad (89)$$

Активная мощность все системы освещения будет рассчитана с учетом коэффициента спроса равного 0,85.

Результаты расчета электрических нагрузок для всех групп сети освещения приведены в таблице 18, где указаны суммарная установленная мощность ламп каждой группы, коэффициент спроса, расчетный коэффициент мощности, а также итоговая расчетная нагрузка для каждой группы светильников.

Таблица 18 – Расчет нагрузок групп сети освещения

Помещение	Группа	Щит	N, шт	P _с , кВт	P _{рпит} , кВт	S _{рпит} , кВА
Основное помещение цеха	Группа №1	ЩО	13	65	0,862	0,898
Основное помещение цеха	Группа №2	ЩО	21	65	1,393	1,451
Основное помещение цеха	Группа №3	ЩО	21	65	1,393	1,451
Основное помещение цеха	Группа №4	ЩО	21	65	1,393	1,451
Основное помещение цеха	Группа №5	ЩО	21	65	1,393	1,451
Основное помещение цеха	Группа №6	ЩО	21	65	1,393	1,451
Основное помещение цеха	Группа №7	ЩО	21	65	1,393	1,451

Продолжение таблицы 18

Помещение	Группа	Щит	N, шт	P _с , кВт	P _{рпит} , кВт	S _{рпит} , кВА
РУ ВН ТП	Группа №8	ЩО	12	20	0,245	0,255
РУ НН ТП	Группа №9	ЩО	6	20	0,122	0,128
Кабинет начальника цеха	Группа №10	ЩО	10	40	0,408	0,425
Склад	Группа №11	ЩО	9	65	0,597	0,622
Фрезерная	Группа №12	ЩО	9	65	0,597	0,622
Заточная	Группа №13	ЩО	6	65	0,398	0,415
Бытовка 1, Бытовка 2, вентиляторная, коридор	Группа №14	ЩО	10	65	0,663	0,691
Аварийное освещение	Группа №1 (авар)	ЩАО	9	20,65	0,505	0,526
Аварийное освещение	Группа №2 (авар)	ЩАО	14	65	0,929	0,967
Эвакуационное освещение	Группа №1 (эваку)	ЩАО	15	12, 3	0,138	0,143
ЩО	-	-	-	-	10,413	10,846
ЩАО	-	-	-	-	1,571	1,637
Итого	-	-	-	-	11,748	12,238

Для последующего выбора сечений проводников необходимо выполнить расчет тока. Все группы сети освещения выполнены в однофазном исполнении. Значение силы тока определяется по формуле (90):

$$I_{\text{рпит}} = \frac{S_{\text{рпит}}}{U_{\text{ф}}} \quad (90)$$

где $U_{\text{ф}}$ – фазное напряжение питания сети освещения, кВ.

Для группы №1 значение силы тока будет равно:

$$I_{\text{р12}} = \frac{0,898}{0,22} = 4,083 \text{ А} \quad (91)$$

Питание щитов освещения будет выполнено в трехфазном исполнении. Расчет силы тока определяется по формуле (92):

$$I_{\text{рпит}} = \frac{S_{\text{рпит}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{л}}} \quad (92)$$

Сила тока фидера питания щита ЩО равна:

$$I_{\text{р12}} = \frac{10,846}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 16,479 \text{ А} \quad (93)$$

Расчет для остальных помещений ведется аналогично, его результаты приведены в таблице 19.

Таблица 19 – Расчет силы тока

Помещение	Группа	Щит	$S_{\text{рпит}},$ кВА	$I_{\text{рпит}},$ А
Основное помещение цеха	Фидер №1	ЩО	0,898	4,083
Основное помещение цеха	Фидер №2	ЩО	1,451	6,595
Основное помещение цеха	Фидер №3	ЩО	1,451	6,595
Основное помещение цеха	Фидер №4	ЩО	1,451	6,595
Основное помещение цеха	Фидер №5	ЩО	1,451	6,595
Основное помещение цеха	Фидер №6	ЩО	1,451	6,595
Основное помещение цеха	Фидер №7	ЩО	1,451	6,595
РУ ВН ТП	Фидер №8	ЩО	0,255	1,160
РУ НН ТП	Фидер №9	ЩО	0,128	0,580
Кабинет начальника цеха	Фидер №10	ЩО	0,425	1,933
Склад	Фидер №11	ЩО	0,622	2,826
Фрезерная	Фидер №12	ЩО	0,622	2,826
Заточная	Фидер №13	ЩО	0,415	1,884
Бытовка 1, Бытовка 2, вентиляторная, коридор	Фидер №14	ЩО	0,691	3,140
Аварийное освещение	Фидер №1 (авар)	ЩАО	0,526	2,392
Аварийное освещение	Фидер №2 (авар)	ЩАО	0,967	4,397
Эвакуационное освещение	Фидер №1 (эваку)	ЩАО	0,143	0,652
ЩО	-	-	10,846	16,479
ЩАО	-	-	1,637	4,409
Итого	-	-	12,238	18,593

Вывод:

Полученные значения мощностей и токов нагрузок будут использованы для выбора кабелей и коммутационных аппаратов.

Заключение

В рамках выпускной квалификационной работы была разработана система электроснабжения промышленного предприятия по производству авиационной техники, включающая в себя расчет электрических нагрузок, выбор трансформаторного оборудования и распределительных устройств, а также определение оптимальной конфигурации электрической сети.

Были определены суммарные нагрузки всех производственных цехов и вспомогательных объектов авиационного предприятия, а также проведен анализ категорий надежности электроснабжения потребителей (1-й, 2-й и 3-й категории). Для главной понизительной подстанции (ГПП) подобраны два трансформатора, обеспечивающие питание от сети высокого напряжения.

На стороне 10 кВ установлены коммутационные аппараты, трансформаторы тока и напряжения. «Электроэнергия распределяется по территории предприятия через цеховые трансформаторные подстанции (ТП), обеспечивающие электроснабжение производственных цехов и групп потребителей.

Размещение главной понизительной подстанции (ГПП) оптимизировано с учетом минимизации потерь электроэнергии в сети и удобства обслуживания оборудования. Цеховые трансформаторные подстанции (ТП) расположены» [9] в непосредственной близости от основных потребителей электроэнергии для сокращения протяженности кабельных линий и снижения потерь напряжения.

Проведенный светотехнический расчет и расчет электрических нагрузок системы освещения производственного цеха позволили определить оптимальные параметры осветительной установки, обеспечивающие соответствие нормативным требованиям по освещенности, равномерности освещения и показателю ослепленности. Полученные результаты подтверждают, что выбранные типы светильников и их расположение позволяют создать комфортные и безопасные условия труда,

соответствующие санитарным нормам и правилам. Расчет электрических нагрузок показал, что суммарная потребляемая мощность системы освещения составляет 11,748 кВт, что свидетельствует об энергоэффективности выбранного решения и позволит существенно снизить затраты на электроэнергию в течение срока эксплуатации системы. Данный показатель необходимо учитывать при проектировании системы электроснабжения цеха, особенно при выборе сечений кабелей и мощности защитных аппаратов.

Реализация данного проекта позволит обеспечить надежное, безопасное и эффективное электроснабжение предприятия по производству авиационной техники, что критически важно для непрерывности производственного процесса и выпуска высококачественной продукции. В свою очередь, это приведет к снижению простоев оборудования, сокращению потерь от брака и повышению общей рентабельности производства, укрепляя конкурентные позиции предприятия на рынке авиационной техники.

Список используемых источников

1. Вахнина В. В. Компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий : учебное пособие. Тольятти : ТГУ, 2015. 67 с.
2. Вахнина В. В., Черненко А. Н. Проектирование систем электроснабжения : электронное учеб.-метод. пособие. Тольятти : ТГУ, 2016. 78 с. [Электронный ресурс]: URL: <https://dspace.tltsu.ru/handle/123456789/2976> (дата обращения: 29.03.2025).
3. Вахнина В. В., Черненко А.Н. Системы электроснабжения : электронное учебное-методическое пособие. Тольятти : ТГУ, 2015. 46 с. [Электронный ресурс]: URL: <https://dspace.tltsu.ru/handle/123456789/2943> (дата обращения: 17.04.2025).
4. Киреева Э.А., Цырук С.А. Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем : учебное издание. М. : Академия, 2020. 320 с.
5. Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов : учебное издание. М. : Академия, 2013. 320 с.
6. Крючков И. П., Старшинов В. А., Гусев Ю. П. Короткие замыкания и выбор электрооборудования : учебное пособие. М. : МЭИ, 2012. 568 с
7. Лебедев В. А., Пискунов В. М. Основы энергетики: учебное пособие для вузов. СПб. : Лань, 2023. 140 с.
8. Морозова Н.Ю. Электротехника и электроника: учебное издание. М. : Академия, 2013. 288 с.
9. Малафеев С. И. Надежность электроснабжения: учебное пособие для вузов. СПб: Лань, 2023. 368 с.
10. ООО «ЭфЛайт». [Электронный ресурс]: URL: <https://ef-light.com> (дата обращения: 20.04.2025).
11. ООО «Амнис». [Электронный ресурс]: <https://www.amnis.ru/> (дата обращения: 20.04.2025).

12. ООО «Тольяттинский трансформатор». [Электронный ресурс]: <https://ttransformator.ru/> (дата обращения: 20.04.2025).
13. Правила устройства электроустановок. 7-е издание. Изд-во ЦентрМаг, 2022. 584 с.
14. РД 153-34.0-20.527-98 «Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования» [Электронный ресурс]: URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294817/4294817179.htm> (дата обращения: 16.04.2025).
15. Рожин А. Н., Бакшаева Н. С. Внутрицеховое электроснабжение: учебное пособие. К : ВятГУ, 2006. 258 с.
16. Скопинцев В.А. Качество электроэнергетических систем. Надежность, безопасность, экономичность, живучесть. Москва: Машиностроение, 2015. 352 с.
17. Electrical Engineering Portal. [Электронный ресурс]: URL: <https://electrical-engineering-portal.com> (дата обращения: 20.04.2025).
18. El-Hawary M. E. *Electrical Power Systems: Design and Analysis*. BR: Wiley IEEE Press, 2024. 808 pp.
19. Glover J. D., Sarma M. S., Overbye T. J., Birchfield A. S. *Power System Analysis and Design*. CL Engineering, 2022. 881 pp.
20. IEEE Industrial Applications Society. [Электронный ресурс]: URL: <https://ias.ieee.org> (дата обращения: 20.04.2025).
21. Khan Shoaib, Khan Sheeba, Ghariani A. *Industrial Power Systems*. CRC Press, 2008. 484 pp.