

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)

Электроснабжение
(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Проектирование системы электроснабжения завода по производству БПЛА

Обучающийся

Н.С. Васильевых

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., О.В. Самолина

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

Консультант

к.п.н., доцент А.В. Егорова

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

Тольятти 2024

Аннотация

В данной работе рассматривается система электроснабжения завода по производству БПЛА. Исследуются основные характеристики предприятия, его технологические процессы и требования к электроснабжению.

В работе проводится расчет электрических нагрузок, выбор оборудования, кабелей и трансформаторов. Учитываются требования по качеству электроэнергии и безопасности эксплуатации системы электроснабжения. В результате предлагается оптимальная схема электроснабжения с учетом всех необходимых требований и нормативов.

Кроме того, проведен расчет молниезащиты и заземления ГПП завода по производству БПЛА.

ВКР представляет собой пояснительную записку, состоящую из введения, восьми разделов основной части, заключения, списка используемой литературы и источников и графической части на 6 листах формата А1. Пояснительная записка выполнена на 88 листах формата А4, содержит 18 таблиц и 10 рисунков.

Annotation

In this paper, the power supply system of the UAV production plant is considered. The main characteristics of the enterprise, its technological processes and requirements for power supply are investigated.

The work includes calculation of electrical loads, selection of equipment, cables and transformers. The requirements for the quality of electricity and the safety of operation of the power supply system are taken into account. As a result, an optimal power supply scheme is proposed, taking into account all necessary requirements and standards.

In addition, the calculation of lightning protection and grounding of the substation of the UAV production plant was carried out.

The final quality work is an explanatory note consisting of an introduction, eight sections of the main part, a conclusion, a list of used literature and sources and a graphic part on 6 sheets of A1 format. The explanatory note is made on 74 A4 sheets, contains 18 tables and 10 figures.

Содержание

Введение	5
1 Анализ исходных данных по электроснабжению потребителей завода	7
2 Расчет электрических нагрузок корпуса	11
3 Выбор и расчет числа и мощности трансформаторов.....	16
3.1 Выбор и расчет числа и мощности трансформаторов цеховых ТП.....	17
3.2 Расчет системы внешнего электроснабжения предприятия	23
3.2.1 Выбор трансформаторов ГПП	23
3.2.2 Выбор питающих линий	28
3.2.3 Расчет токов короткого замыкания в питающей сети	30
3.2.4 Выбор электрооборудования	32
4 Расчет токов короткого замыкания	40
5 Выбор и расчет электрических аппаратов и проводников.....	50
6 Выбор основного электрооборудования и его проверка.....	56
7 Выбор устройств релейной защиты и автоматики	68
8 Расчет заземления и молниезащиты.....	73
Заключение	83
Список используемых источников.....	85

Введение

В современном мире промышленность стремительно развивается, особенно в области авиационных технологий. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) становятся все более востребованными в различных сферах, начиная от военного применения до коммерческих и научных исследований. «Вместе с этим возрастает и потребность в эффективных системах электроснабжения, способных обеспечить надежную работу и бесперебойное функционирование таких технологически сложных объектов, как заводы по производству БПЛА.

Данная выпускная квалификационная работа посвящена проектированию системы электроснабжения для завода по производству беспилотных летательных аппаратов. Этот проект имеет стратегическое значение в контексте развития авиационной промышленности и применения беспилотных технологий в различных областях деятельности.

В работе будет рассмотрена актуальность проблемы, особенности проектирования системы электроснабжения для завода по производству БПЛА, а также предложены решения, направленные на оптимизацию процессов производства и обеспечение высокой надежности и эффективности работы предприятия.

Целью данного исследования является разработка комплексного подхода к проектированию системы электроснабжения, учитывающего специфику производства беспилотных летательных аппаратов и обеспечивающего оптимальное соответствие потребностям предприятия.

Предметом исследования ВКР является система электроснабжения завода по производству БПЛА.

В соответствии с поставленной целью определены следующие задачи:

- провести анализ исходных данных по электроснабжению потребителей завода по производству беспилотных летательных аппаратов;

- выполнить расчет электрических нагрузок завода по производству беспилотных летательных аппаратов;
- выбрать число и мощность трансформаторов;
- выбрать электрические аппараты и проводники завода по производству беспилотных летательных аппаратов (БПЛА);
- выбрать основное электрооборудование;
- выбрать устройства релейной защиты и автоматики завода по производству беспилотных летательных аппаратов;
- рассчитать заземление и молниезащиту ГПП завода по производству беспилотных летательных аппаратов.

«Таким образом, результатом данной ВКР должна стать детально проработанная система электроснабжения завода, обеспечивающая надежную и стабильную работу всего оборудования, необходимого для производства БПЛА» [26]. Это позволит повысить качество выпускаемой продукции и конкурентоспособность предприятия на рынке беспилотных систем.

1 Анализ исходных данных по электроснабжению потребителей завода

Этот раздел выпускной квалификационной работы посвящен анализу исходных данных по электроснабжению потребителей на заводе по производству беспилотных летательных аппаратов. Важным этапом проектирования системы электроснабжения является полное и всестороннее понимание потребностей и требований к энергетическим ресурсам со стороны производственного процесса и других потребителей на предприятии.

«Цель данного раздела состоит в анализе текущего состояния электроснабжения завода, выявлении основных потребителей электроэнергии, оценке энергетических нагрузок и выявлении факторов, влияющих на эффективность и надежность работы системы электроснабжения» [26].

В ходе исследования будут рассмотрены следующие аспекты:

- структура потребителей электроэнергии: анализ различных подразделений и производственных участков завода с целью определения основных потребителей электроэнергии и их энергетических потребностей;
- профили энергопотребления: изучение характеристик и особенностей энергопотребления в различные периоды времени «(например, по часам, дням недели, временам года) для определения пиковых нагрузок и оптимизации расхода электроэнергии;
- технологические процессы и энергетические требования: анализ особенностей технологических процессов на заводе и их влияние на потребление электроэнергии» [26], а также выявление возможных узких мест и проблемных зон.

Анализ исходных данных по электроснабжению потребителей завода предоставит базовую информацию для разработки оптимальной системы электроснабжения, способной эффективно удовлетворять потребности производства и обеспечивать стабильную работу предприятия.

Рассматриваемое предприятие можно охарактеризовать следующими параметрами:

- «категория основных потребителей по надёжности электроснабжения – II.
- число часов использования максимума нагрузки 4960 ч/год.
- расстояние от предприятия до питающей подстанции 6,5 км» [26].

Характеристики цехов проектируемого предприятия представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики цехов проектируемого предприятия

№ цеха	Наименование цехов и узлов СЭС	n_{Σ}	P_{Σ} , кВт	$K_{ИА}$	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$
1	Кислородная станция	9	335	0,45	0,70	1,02
2	Склад химреактивов	7	50	0,25	0,65	1,17
3	Насосная станция	9	300	0,70	0,80	0,75
4	Склад готовой продукции	10	575	0,30	0,65	1,17
5	Склад	6	180	0,25	0,65	1,17
6	Компрессорная станция	5	1120	0,80	0,75	0,88
7	Покрасочный цех	27	3075	0,60	0,70	1,02
8	Сборочный цех №1	96	6820	0,55	0,65	1,17
9	Сборочный цех №2	81	6020	0,50	0,60	1,33
10	Заготовительный цех	40	8380	0,45	0,65	1,17
11	Гараж	5	85	0,30	0,60	1,33
12	Ремонтно-механический цех	92	3754	0,27	0,61	1,30
13	Заводоуправление	12	205	0,50	0,80	0,75
14	Склад РМЦ	11	195	0,25	0,65	1,17
–	Нагрузка 10 кВ	–	–	–	–	–
1	Кислородная станция	–	–	–	–	–
–	Асинхронные двигатели (АД)	4	2520	0,70	0,75	0,88
6	Компрессорная станция	–	–	–	–	–
–	Синхронные двигатели (СД)	4	1600	0,70	0,75	–0,88
10	Заготовительный цех	–	–	–	–	–
–	Преобразователи (ПЧ)	6	3780	0,55	0,75	0,88

Кислородная станция предназначена для выработки на предприятии кислорода и азота, который необходим в технологическом процессе. Основными потребителями станции являются низковольтные и высоковольтные воздуходелительные установки и компрессорные машины. Напряжение питания высоковольтного оборудования 10 кВ. Напряжение питания низковольтного оборудования 380 В.

Компрессорная станция предназначена для получения сжатого воздуха, используемого в пневмооборудовании и пневмоинструменте. Приводами к компрессорам «служат высоковольтные электродвигатели. Напряжение питания переменное – 10 кВ. Основными потребителями 380 В компрессорной являются компрессоры и вентиляторы. Режим работы приводов вентиляторов и компрессоров продолжительный, график нагрузки практически постоянный.

Покрасочный цех предназначен для» [23] покраски готовых изделий. Электроприемниками покрасочного цеха являются камеры подготовки и камеры окраски с собственной вентиляцией. Напряжение питания – 380 В.

В сборочных цехах завода по производству беспилотных летательных аппаратов осуществляется сборка и монтаж различных компонентов и систем, необходимых для создания функционального и надежного БПЛА. Эти цеха играют ключевую роль в производственном процессе, где происходит слияние инженерных концепций, высокотехнологичных материалов и компонентов в единое целое - инновационное авиационное устройство. Напряжение питания – 380 В.

В заготовительном цехе происходит заготовка сырья для его дальнейшей отправки в основное производство, следуя технологическому процессу. Основными низковольтными потребителями электроэнергии являются грузоподъемные механизмы и транспортеры. Напряжение питания – 380 В. Высоковольтными потребителями электроэнергии данного цеха являются преобразователи частоты. Напряжение питания – 10 кВ.

Заводоуправление предназначено для размещения ИТР, бухгалтерии и управления предприятия. Потребителями электроэнергии являются освещение и офисная и бытовая техника различного вида. Напряжение питания – 220 В.

План завода по производству БПЛА представлен на рисунке 1.

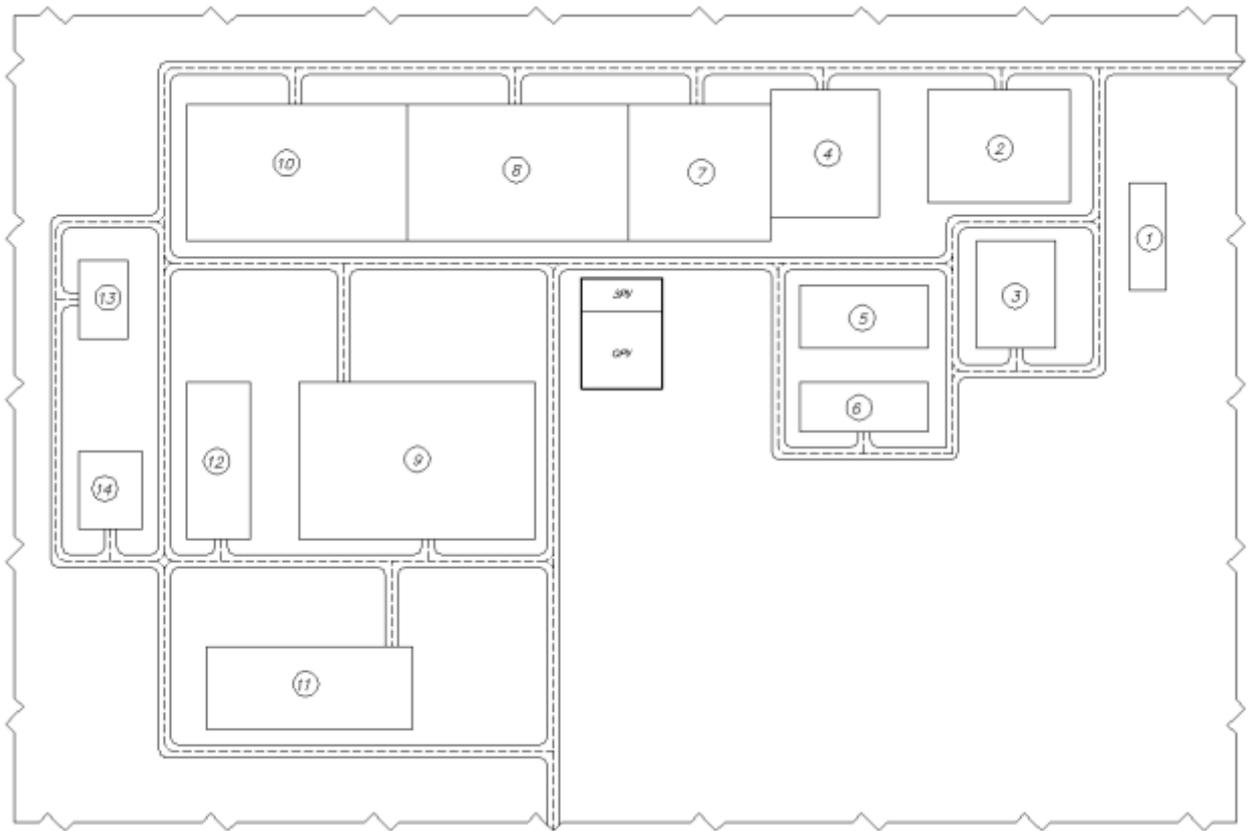


Рисунок 1 – План предприятия

Выводы по разделу 1

В первом разделе выпускной квалификационной работы проведен анализ исходных данных по электроснабжению потребителей завода. В ходе анализа исходных данных по электроснабжению потребителей на заводе по производству беспилотных летательных аппаратов были выявлены ключевые аспекты, оказывающие влияние на энергетические процессы на предприятии. Приведены характеристики цехов проектируемого предприятия, план предприятия. На основе полученных данных были сделаны выводы о необходимости разработки оптимальной системы электроснабжения, способной эффективно удовлетворять потребности завода по производству БПЛА и обеспечивать стабильную и надежную работу предприятия. Этот раздел работы является важным этапом проектирования системы электроснабжения и предоставляет базовую информацию для разработки дальнейших решений по оптимизации энергетических процессов на предприятии.

2 Расчет электрических нагрузок корпуса

Раздел «Расчет электрических нагрузок» является ключевым этапом в проектировании системы электроснабжения для завода по производству беспилотных летательных аппаратов. В этом разделе будет проведен подробный анализ потребления электроэнергии на предприятии с целью определения объемов и характеристик нагрузок, а также выявления основных факторов, влияющих на электроэнергетическую инфраструктуру завода.

Цель данного раздела заключается в разработке математических моделей и методов расчета электрических нагрузок, которые позволят точно определить требуемую мощность, напряжение, токи и другие параметры электроснабжения для обеспечения бесперебойной и эффективной работы производственного процесса.

В ходе работы в этом разделе будут рассмотрены следующие аспекты:

- идентификация потребителей: определение всех основных потребителей электроэнергии на заводе, включая производственное оборудование, системы освещения, отопления, вентиляции, офисные помещения и другие энергопотребляющие устройства;
- сбор данных: сбор и систематизация информации о характеристиках и режимах работы каждого потребителя электроэнергии, а также данных о пиковых и средних нагрузках в различные периоды времени;
- математическое моделирование: разработка математических моделей и алгоритмов для расчета электрических нагрузок на основе полученных данных и учета технологических особенностей производства;
- оценка потенциала для оптимизации: идентификация возможных областей для оптимизации энергопотребления и повышения энергоэффективности на заводе;

– прогнозирование будущего энергопотребления: разработка прогнозов по электрическим нагрузкам с учетом планируемого расширения производства и внедрения новых технологий.

Этот раздел является основой для последующего проектирования системы электроснабжения, которая должна обеспечить стабильное и эффективное электропитание завода по производству БПЛА.

«Для каждого цеха определяются средние мощности» [13]:

$$P_{\text{cp}} = k_{\text{на}} \cdot P_{\Sigma}, \quad (1)$$

$$Q_{\text{cp}} = k_{\text{на}} \cdot P_{\Sigma} \cdot \text{tg}\varphi, \quad (2)$$

где n – «число электроприемников;

$P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность одного электроприемника, кВт.

В качестве примера рассматривается кислородная станция» [13]:

$$P_{\text{cp}} = 0,45 \cdot 335 = 151 \text{ кВт.}$$

$$Q_{\text{cp}} = 0,45 \cdot 335 \cdot 1,02 = 154 \text{ квар.}$$

«Расчетные активная и реактивная мощности цеха» [13]:

$$P_{\text{р.ц}} = K_{\text{ра}} \cdot \sum_{i=1}^n K_{\text{на}i} \cdot P_{\text{ном}i}, \quad (3)$$

$$Q_{\text{р.ц}} = K_{\text{ра}} \cdot \sum_{i=1}^n K_{\text{на}i} \cdot P_{\text{ном}i} \cdot \text{tg}\varphi_i, \quad (4)$$

где $K_{\text{ра}}$ – коэффициент расчетной нагрузки по активной мощности,

$$P_{\text{р.ц}} = 1,08 \cdot 151 = 163 \text{ кВт;}$$

$$Q_{\text{р.ц}} = 1,08 \cdot 154 = 166 \text{ квар.}$$

«Для расчета полной расчетной мощности цеха, необходимо учесть осветительную нагрузку» [13]:

$$P_{p.осв} = k_{с.осв} \cdot P_{у.осв} \cdot F_{ц}, \quad (5)$$

где $k_{с.осв}$ – «коэффициент спроса по активной мощности осветительной нагрузки;

$P_{у.осв}$ – удельная осветительная нагрузка на 1 м² производственной поверхности пола цеха, Вт/м²;

$F_{ц}$ – поверхность пола цеха, м²» [13].

«Расчетная реактивная мощность осветительной нагрузки» [13]:

$$Q_{p.осв} = P_{p.осв} \cdot \operatorname{tg}\varphi_{осв}, \quad (6)$$

где $\operatorname{tg}\varphi_{осв}$ – коэффициент реактивной мощности осветительной нагрузки.

Например, для кислородной станции

$$P_{p.осв} = 0,80 \cdot 0,015 \cdot 2464 = 30 \text{ кВт},$$

$$Q_{p.осв} = 30 \cdot 0,3 = 9,0 \text{ квар.}$$

Полная расчетная низковольтная нагрузка цеха определяется по формуле

$$S_{p.ц} = \sqrt{(P_{p.ц} + P_{p.осв})^2 + (Q_{p.ц} + Q_{p.осв})^2}. \quad (7)$$

$$S_{p.ц} = \sqrt{(694,9 + 71,5)^2 + (900,5 + 23,5)^2} = 1200,5 \text{ кВА.}$$

Аналогично рассчитываются расчетные мощности для остальных цехов. Результаты расчета сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Расчет электрических нагрузок по предприятию

№ цеха	Наименование цехов и узлов СЭС	nэ	P _Σ , кВт	K _{ИЛ}	cosφ	tgφ	P _С , кВт	Q _С , квар	K _{РА}	P _Р , кВт	Q _Р , квар	F _Ц , м ²	P _{уд} , кВт/м ²	K _{СО}	cosφ ₀	tgφ ₀	P _{РО} , кВт	Q _{РО} , квар	P _Р +P _{РО} , кВт	Q _Р +Q _{РО} , квар	S, кВА
–	Низковольтная нагрузка																				
1	Кислородная станция	9	335	0,45	0,70	1,02	151	154	1,08	163	166	2464	0,015	0,80	0,95	0,3	30	9	192	175	260
2	Склад химреактивов	7	50	0,25	0,65	1,17	13	15	1,38	17	20	10672	0,010	0,60	0,95	0,3	64	19	81	39	90
3	Насосная станция	9	300	0,70	0,80	0,75	210	158	0,90	189	142	5632	0,010	0,80	0,95	0,3	45	14	234	155	281
4	Склад готовой продукции	10	575	0,30	0,65	1,17	173	202	0,90	155	182	9152	0,010	0,60	0,95	0,3	55	16	210	198	289
5	Склад	6	180	0,25	0,65	1,17	45	53	1,43	64	75	5408	0,010	0,60	0,95	0,3	32	10	97	85	129
6	Компрессорная станция	5	1120	0,80	0,75	0,88	896	790	0,93	833	735	4160	0,015	0,80	0,95	0,3	50	15	883	750	1159
7	Покрасочный цех	27	3075	0,60	0,70	1,02	1845	1882	0,85	1568	1600	12992	0,020	0,90	0,95	0,3	234	70	1802	1670	2457
8	Сборочный цех №1	96	6820	0,55	0,65	1,17	3751	4385	0,77	2888	3377	20160	0,020	0,90	0,95	0,3	363	109	3251	3486	4767
9	Сборочный цех №2	81	6020	0,50	0,60	1,33	3010	4013	0,75	2258	3010	23576	0,020	0,90	0,95	0,3	424	127	2682	3137	4127
10	Заготовительный цех	40	8380	0,45	0,65	1,17	3771	4409	0,77	2904	3395	20160	0,020	0,90	0,95	0,3	363	109	3267	3504	4790
11	Гараж	5	85	0,30	0,60	1,33	26	34	1,35	34	46	11424	0,010	0,60	0,95	0,3	69	21	103	66	123
12	Ремонтно–механический цех	92	3754	0,27	0,61	1,30	1007	1305	0,69	695	901	5293	0,015	0,90	0,95	0,33	71	24	766	924	1201
13	Заводоуправление	12	205	0,50	0,80	0,75	103	77	1,03	106	79	2560	0,015	0,85	0,95	0,3	33	10	138	89	164
14	Склад РМЦ	11	195	0,25	0,65	1,17	49	57	1,23	60	70	3328	0,010	0,60	0,95	0,3	20	6	80	76	110
–	освещение территории											482019	0,001	0,95	0,3	1,00	482	145	482	145	503
–	Итого по нагрузке 0,4 кВ	275	31094	0,48	0,65	1,17	15048	17533	0,79	11934	13797	–	–	–	–	–	2335	703	14269	14499	20343

Продолжение таблицы 2

№ цеха	Наименование цехов и узлов СЭС	nэ	P _Σ , кВт	K _{ИИ}	cosφ	tgφ	P _С , кВт	Q _С , квар	K _{РА}	P _Р , кВт	Q _Р , квар	F _Ц , м ²	P _{уд} , кВт/м ²	K _{СО}	cosφ ₀	tgφ ₀	P _{РО} , кВт	Q _{РО} , квар	P _Р +P _{РО} , кВт	Q _Р +Q _{РО} , квар	S, кВА
–	Нагрузка 10 кВ	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1	Кислородная станция	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
–	Асинхронные двигатели (АД)	4	2520	0,70	0,75	0,88	1764	1556	1,00	1764	1556	–	–	–	–	–	–	–	1764	1556	4
6	Компрессорная станция	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
–	Синхронные двигатели (СД)	4	1600	0,70	0,75	–0,88	1120	–988	1,00	1120	–988	–	–	–	–	–	–	–	1120	–988	4
10	Заготовительный цех	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
–	Преобразователи (ПЧ)	6	3780	0,55	0,75	0,88	2079	1834	1,00	2079	1834	–	–	–	–	–	–	–	2079	1834	–
–	Итого по нагрузке 10 кВ	14	7900	0,63	0,90	0,48	4963	2401	–	4963	2401	–	–	–	–	–	–	–	4963	2401	–
–	Итого по предприятию	–	38994	0,51	0,71	1,00	20011	19935	0,85	16897	16198	–	–	–	–	–	2335	703	19232	16901	25603

Выводы по разделу 2.

Во втором разделе ВКР проведен расчет электрических нагрузок предприятия. В результате проведенного анализа и расчета электрических нагрузок завода по производству беспилотных летательных аппаратов были получены важные выводы, определяющие требования к системе электроснабжения и направляющие процесс ее проектирования.

Выявлены основные потребители электроэнергии на предприятии, включая производственное оборудование, системы освещения, отопления, вентиляции, а также офисные помещения. Этот анализ позволил определить объемы и характеристики нагрузок, а также выделить критические точки, где необходимо обеспечить высокую надежность электроснабжения.

Наконец, разработанные прогнозы по электрическим нагрузкам позволят предвидеть будущие потребности предприятия в электроэнергии и адаптировать систему электроснабжения с учетом планируемого расширения производства и внедрения новых технологий.

3 Выбор и расчет числа и мощности трансформаторов

3.1 Выбор и расчет числа и мощности трансформаторов цеховых ТП

«Этот раздел выпускной квалификационной работы посвящен выбору и расчету числа и мощности трансформаторов цеховых трансформаторных подстанций» [14] (ТП) на заводе по производству беспилотных летательных аппаратов. Цеховые ТП играют важную роль в распределении и обеспечении электроэнергией различных производственных участков и помещений предприятия. «Цель данного раздела заключается в определении оптимального количества и мощности трансформаторов для обеспечения энергетических потребностей завода по производству БПЛА с учетом его специфики и особенностей производства. Выбор числа и мощности трансформаторов в цеховой ТП» [14] зависит от ряда факторов, таких как категория надежности электроснабжения потребителей, график нагрузки, территориальное расположение потребителей и т.д. Для определения числа и мощности трансформаторов необходимо произвести расчет электрических нагрузок, определить требуемую мощность трансформаторов и выбрать наиболее подходящий вариант из стандартных значений мощностей трансформаторов. Этот «раздел является важным этапом в проектировании системы электроснабжения завода и позволит обеспечить надежное и эффективное электропитание всех производственных процессов и устройств.

Количество трансформаторов всех подстанций цеха определяем по формуле» [14]:

$$N_0 = \frac{P_{р.ц}}{k_{з,доп} \cdot S_{т.н}}, \quad (8)$$

где $P_{р.ц}$ – «расчетная активная нагрузка цеха, Вт;

$S_{т.н}$ – выбранная номинальная мощность трансформаторов цеховых ТП, кВА;
 $K_{з.доп}$ – допустимый коэффициент загрузки трансформатора» [14].

«При установке в цехе двухтрансформаторной ТП номинальная мощность трансформатора определяется из условия» [14]:

$$S_{т.н} \geq \frac{P_{р.ц}}{N_T \cdot K_{з.доп}}, \quad (9)$$

где $N_T = 2$ – число трансформаторов в цехе.

«Величина наибольшей реактивной мощности, которую силовой трансформатор может передать в сеть низшего напряжения из условия допустимой загрузки» [14]:

$$Q_{1р} = \sqrt{(N_T \cdot K_{з.доп} \cdot S_{т.н})^2 - P_{р.ц}^2}. \quad (10)$$

«В общем случае мощности $Q_{1р}$ и $Q_{р.ц}$ не равны. Поэтому реальная величина реактивной мощности Q_1 , проходящей через трансформатор определяется из соотношений» [14]:

$$Q_1 = \begin{cases} Q_{р.ц}, & \text{если } Q_{1р} \geq Q_{р.ц} \\ Q_{1р}, & \text{если } Q_{1р} < Q_{р.ц} \end{cases}. \quad (11)$$

«Если мощность $Q_{1р}$ меньше нагрузки $Q_{р.ц}$, то есть трансформаторы ТП не могут пропустить всю расчётную реактивную нагрузку $Q_{р.ц}$, то для устранения дефицита реактивной мощности на стороне НН ТП необходимо установить конденсаторную батарею, мощность которой равна» [14]:

$$Q_{к.н} = Q_{р.ц} - Q_1, \quad (12)$$

«Для трансформаторов выбранной мощностью определяются фактические коэффициенты загрузки в нормальном и послеаварийном режимах работы ТП» [14]:

$$K_{з.н} = \frac{\sqrt{P_{р.ц}^2 + Q_1^2}}{N_T \cdot S_{Т.н}}. \quad (13)$$

$$K_{з.п} = \frac{\sqrt{P_{р.ц}^2 + Q_1^2}}{(N_T - 1) \cdot S_{н.т.і}}. \quad (14)$$

«Например, для насосной станции категория по надёжности электроснабжения вторая, значит, в данном цехе необходимо предусмотреть установку двухтрансформаторной ТП.

При установке в цехе двухтрансформаторной ТП номинальная мощность трансформатора определяется из условия» [14]:

$$S_{Т.н} \geq \frac{508}{2 \cdot 0,8} = 317 \text{ кВА}.$$

«Поэтому принимаем единичную мощность трансформаторов 400 кВА.

Величина наибольшей реактивной мощности, которую силовой трансформатор может передать в сеть низшего напряжения из условия допустимой загрузки» [14]:

$$Q_{1р} = \sqrt{(2 \cdot 0,8 \cdot 400)^2 - 508^2} = 390 \text{ квар}.$$

Так как

$$Q_{\text{Iр}} > Q_{\text{р.ц}},$$
$$390 \text{ квар} > 370 \text{ квар},$$

«то на стороне низшего напряжения ТП установка низковольтных конденсаторных батарей не требуется.

Фактические коэффициенты загрузки в нормальном и послеаварийном режимах работы ТП» [14]:

$$K_{\text{з.н}} = \frac{\sqrt{508^2 + 370^2}}{2 \cdot 400} = 0,79,$$

$$K_{\text{з.п}} = \frac{\sqrt{508^2 + 370^2}}{(2-1) \cdot 400} = 1,58.$$

«В аварийном режиме необходимо отключить часть нагрузки третьей категории, чтобы коэффициент перегрузки стал равен 1,4. Выбор остальных ЦТП, осуществляется аналогично. Результаты расчета представлены в таблице 3. План предприятия с расположением выбранных ТП и питающей ВЛ представлен на рисунке 2» [14].

Таблица 3 – Выбор трансформаторов цеховых ТП

№ цеха	Наименование цехов и узлов СЭС	К.Н.	P _P , кВт	Q _P , квар	S _P , кВА	F _Ц , м ²	Тип Тр, №ТП	S _{НОМТР} , кВА	n _т	К _{зтдоп}	Q _{1P} , квар	Q ₁ , квар	Q _{КУ} , квар	К _{зтНОРМ}	К _{зтП/АВ}	ΔP _{ХХ} , кВт	ΔP _{КЗ} , кВт	I _{ХХ} , %	U _{КЗ} , %	ΔP _T , кВт	ΔQ _T , квар	P _{P+ΔP_T} , кВт	Q _{T+ΔQ_T} , квар	S _P , кВА
1	Кислородная станция	2	192	175	260	2464	РПН-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	Склад химреактивов	3	81	39	90	10672	РПН-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	Насосная станция	2	234	155	281	5632	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	Итого по ТП1:		508	370	631	5632	ТМГ	400	2	0,8	390	370	0	0,79	1,4*	0,72	5,5	1,0	4,5	8	30	516	400	653
4	Склад готовой продукции	3	210	198	289	9152	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	Итого по ТП2:		210	198	289	9152	ТМГ	400	1	0,9	292	198	0	0,72	-	0,72	5,5	1,0	4,5	4	13	214	211	301
5	Склад	3	97	85	129	5408	РПН-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	Компрессорная станция	2	883	750	1159	4160	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	Итого по ТП3:		980	835	1287	5408	ТМГ	630	2	0,8	236	236	599	0,80	1,4*	1,68	5,6	1,8	5,5	11	67	991	902	1340
7	Покрасочный цех	2	1802	1670	2457	12992	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	Итого по ТП4-ТП5:		1802	1670	2457	12992	ТМГ	630	4	0,8	904	904	766	0,80	1,4*	1,68	5,6	1,8	5,5	21	134	1823	1804	2565
8	Сборочный цех №1	2	3251	3486	4767	20160	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	Итого по ТП6-ТП7:		3251	3486	4767	20160	ТМГ	1600	4	0,8	3955	3486	0	0,74	1,4*	1,70	17,3	0,5	6,0	45	245	3296	3731	4978
9	Сборочный цех №2	2	2682	3137	4127	23576	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	Итого по ТП8-ТП9:		2682	3137	4127	23576	ТМГ	1000	4	0,8	1746	1746	1392	0,80	1,4*	1,90	10,8	1,2	5,5	35	189	2717	3326	4295
10	Заготовительный цех	2	3267	3504	4790	20160	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	Заводоуправление	2	138	89	164	2560	РПН-4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	Итого по ТП10-ТП11:		3405	3593	4955	20160	ТМГ	1250	4	0,8	2099	2099	1493	0,80	1,4*	2,65	10,8	1,2	4,8	38	214	3443	3806	5132

Продолжение таблицы 3

№ цеха	Наименование цехов и узлов СЭС	К.Н.	P _p , кВт	Q _p , квар	S _p , кВА	F _ц , м ²	Тип Тр, №ТП	S _{НОМТР} , кВА	пт	КзТДОЛ	Q _{1p} , квар	Q ₁ , квар	Q _{ку} , квар	КзТНОРМ	КзТПАВ	ΔP _{XX} , кВт	ΔP _{кз} , кВт	I _{XX} , %	U _{кз} , %	ΔP _T , кВт	ΔQ _T , квар	P _p +ΔP _T , кВт	Q ₁ +ΔQ _T , квар	S _p , кВА
12	Ремонтно–механический цех	3	766	924	1201	5293	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	Гараж	3	103	66	123	11424	РПН-5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	Склад РМЦ	3	80	76	110	3328	РПН-6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	Итого по ТП12:		949	1067	1433	5293	ТМГ	1250	1	0,9	604	604	0	0,90	-	2,65	10,8	1,2	4,8	11	64	961	1130	1483
-	Потери в эл/техн.установках	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	Заготовительный цех	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	ПЧ1 630 кВт	-	630	554	840	-	ТСЗП	1000	1	1	-	-	-	-	-	2,00	9	1,5	6,0	2	15	632	569	851
-	ПЧ2 630 кВт	-	630	554	840	-	ТСЗП	1000	1	1	-	-	-	-	-	2,00	9	1,5	6,0	2	15	632	569	851
-	ПЧ3 630 кВт	-	630	554	840	-	ТСЗП	1000	1	1	-	-	-	-	-	2,00	9	1,5	6,0	2	15	632	569	851
-	ПЧ4 630 кВт	-	630	554	840	-	ТСЗП	1000	1	1	-	-	-	-	-	2,00	9	1,5	6,0	2	15	632	569	851
-	ПЧ5 630 кВт	-	630	554	840	-	ТСЗП	1000	1	1	-	-	-	-	-	2,00	9	1,5	6,0	2	15	632	569	851
-	ПЧ6 630 кВт	-	630	554	840	-	ТСЗП	1000	1	1	-	-	-	-	-	2,00	9	1,5	6,0	2	15	632	569	851
-	Итого	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	185	1046	-	-	-

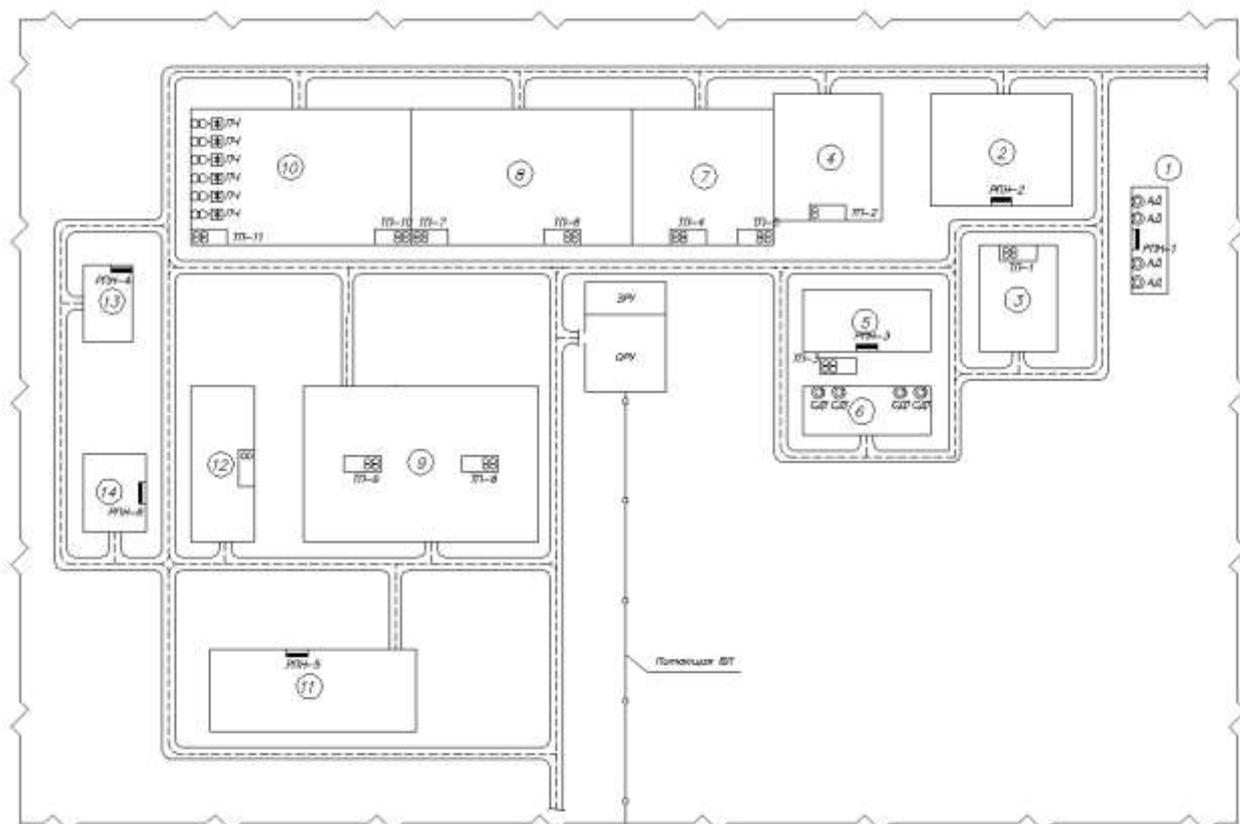


Рисунок 2 – План предприятия с расположением выбранных ТП и питающей ВЛ

3.2 Расчет системы внешнего электроснабжения предприятия

3.2.1 Выбор трансформаторов ГПП

Данный раздел ВКР посвящен важному этапу проектирования СЭС завода по производству беспилотных летательных аппаратов - выбору трансформаторов для главной понизительной подстанции (ГПП). ГПП является ключевым элементом электроснабжения предприятия, от которого зависит надежность и эффективность работы всей энергетической системы. Цель данного расчета состоит в определении оптимальных параметров трансформаторов ГПП, обеспечивающих стабильное и надежное электропитание всех производственных участков и оборудования завода.

«Номинальная мощность силовых трансформаторов подстанции определяется из условия получения из энергосистемы всей необходимой

расчётной активной мощности предприятия и нормированного значения реактивной мощности» [15]:

$$S_{p.п} = \sqrt{P_{p.п}^2 + (Q_{эс} - \Delta Q_{т.ГПП})^2}, \quad (15)$$

где $Q_{эс}$ – «экономически целесообразная реактивная мощность на стороне высшего напряжения ГПП, потребляемая предприятием от энергосистемы, квар» [15];

$\Delta Q_{т.ГПП}$ – «потери реактивной мощности в трансформаторах ГПП, квар» [15].

«Экономически целесообразная реактивная мощность на стороне высшего напряжения ГПП, потребляемая предприятием от энергосистемы равна» [15]:

$$Q'_{эс} = P_{p.п} \cdot \operatorname{tg}\varphi_{\text{норм}}, \quad (16)$$

$$Q_{эс.110} = Q'_{эс.110} = 8428 \text{ квар.}$$

«Полная расчетная нагрузка предприятия, необходимая для выбора трансформаторов на ГПП» [15]:

$$S_{p.п.110} = \sqrt{16855^2 + 8428^2} = 18844 \text{ квар.}$$

При установке двух силовых трансформаторов на ГПП создается резервный режим работы, что повышает надежность и обеспечивает электроснабжение в случае отказа одного из трансформаторов. Этот подход применяется для обеспечения бесперебойной работы электроснабжения даже в условиях непредвиденных ситуаций, таких как отказ оборудования или аварийное отключение [15].

Правильный выбор мощности трансформаторов играет ключевую роль в обеспечении надежности электроснабжения. Важно, чтобы мощность каждого трансформатора была достаточной для покрытия пиковых нагрузок и обеспечения нормального функционирования всех «потребителей при работе одного трансформатора. Номинальная мощность каждого трансформатора определяется из соотношений» [15]:

$$S_{\text{т.ном}} \geq \frac{S_{\text{р.п}}}{n \cdot k_{\text{з.н}}}, \quad (17)$$

где $n = 2$ – «число трансформаторов ГПП;

$k_{\text{з.н}} = 0,7$ – коэффициент загрузки трансформаторов в нормальном режиме» [16].

$$S_{\text{т.ном.110}} \geq \frac{18844}{2 \cdot 0,7} = 13460 \text{ кВА.}$$

Выбор правильной мощности трансформаторов должен учитывать не только текущие энергетические потребности завода, но и предусматривать запас по мощности для обеспечения надежности работы системы в случае аварийных ситуаций.

Таким образом, правильный выбор мощности трансформаторов позволяет обеспечить стабильное и безопасное электроснабжение завода даже в условиях возможных отказов оборудования. «Таким образом, принимаются трансформаторы ТДН–16000/110/10, технические характеристики которых представлены в таблице 4» [20].

Таблица 4 – Технические характеристики трансформаторов

$S_{\text{т}}$, МВА	$U_{\text{вн}}$, кВ	$U_{\text{нн}}$, кВ	$\Delta P_{\text{кз}}$, кВт	$\Delta P_{\text{хх}}$, кВт	$U_{\text{кз}}$, %	$I_{\text{хх}}$, %
16	110	10	85	18	10,5	0,5

Коэффициент загрузки выбранных трансформаторов:

$$k_{з.н.} = \frac{S_{р.п.}}{n \cdot S_{н.т.}} \quad (18)$$

$$k_{з.н.110} = \frac{18844}{2 \cdot 16000} = 0,59.$$

Схема внешнего электроснабжения завода по производству БПЛА приведена на рисунке 3.

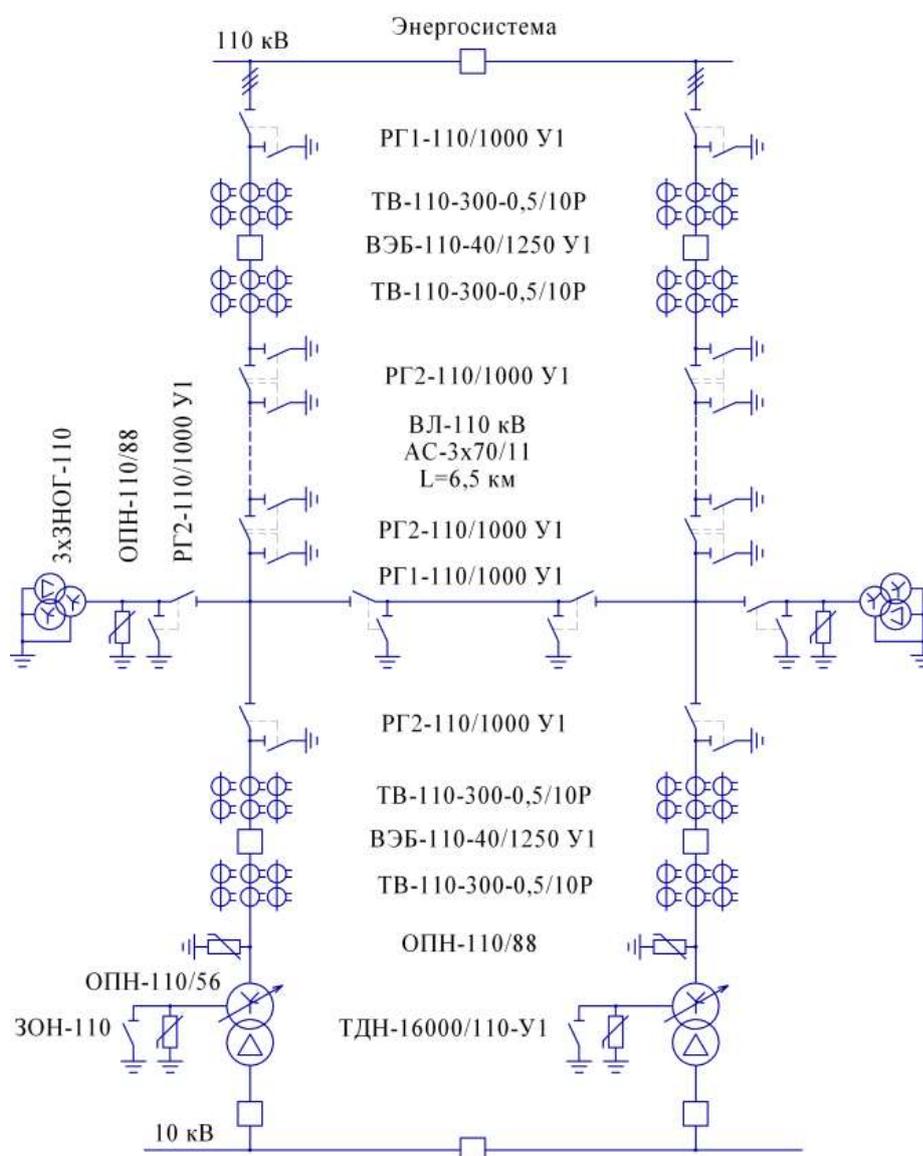


Рисунок 3 – Схема внешнего электроснабжения завода по производству БПЛА

«Определение потерь электроэнергии в силовых трансформаторах ГПП.
Потери активной мощности в трансформаторах» [15]:

$$\Delta P_T = n(\Delta P_{XX} + k_{3.H.}^2 \Delta P_{K3}), \quad (19)$$

где n – «число трансформаторов ГПП;

ΔP_{XX} – потери XX, кВт;

ΔP_{K3} – потери КЗ, кВт» [15].

$$\Delta P_T = 2 \cdot (18 + 0,58^2 \cdot 85) = 95 \text{ кВт}.$$

«Потери реактивной мощности в трансформаторах» [15]:

$$\Delta Q_T = n \left(\frac{I_{XX}}{100} S_{H.T} + k_{3.H.}^2 \frac{U_K}{100} S_{H.T} \right), \quad (20)$$

где I_{XX} – «ток XX трансформатора, %;

U_K – напряжение КЗ, %» [15].

$$\Delta Q_T = 2 \cdot \left(\frac{0,5}{100} \cdot 16000 + 0,58^2 \cdot \frac{10,5}{100} \cdot 16000 \right) = 1330 \text{ квар}.$$

«Потери электроэнергии в трансформаторах» [15]:

$$\Delta A_T = n(\Delta P_{XX} \cdot T_T + k_{3.H.}^2 \cdot \Delta P_{K3} \cdot \tau), \quad (21)$$

где τ – «годовое число часов максимальных потерь, ч/год» [15].

«Годовое число часов максимальных потерь» [15]:

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_m}{10^4} \right)^2 \cdot 8760, \quad (22)$$

где T_m – «годовое число часов использования получасового максимума активной нагрузки, ч/год» [15];

$$\tau = \left(0,124 + \frac{4960}{10^4} \right)^2 \cdot 8760 = 3367 \frac{\text{ч}}{\text{год}}.$$

«Тогда потери электроэнергии в трансформаторах составят» [15]:

$$\Delta A_{\tau} = 2 \cdot \left(18 \cdot 8760 + 0,58^2 \cdot 85 \cdot 3367 \right) = 515 \frac{\text{МВт} \cdot \text{ч}}{\text{год}}.$$

3.2.2 Выбор питающих линий

Выбор питающих линий является важным этапом в проектировании системы электроснабжения завода по производству беспилотных летательных аппаратов. Правильный выбор параметров и характеристик питающих линий имеет ключевое значение для обеспечения надежной и эффективной передачи электроэнергии от источников к потребителям на предприятии.

Цель данного раздела заключается в определении оптимальных параметров питающих линий, которые обеспечат стабильное электроснабжение всех производственных участков и оборудования завода, с учетом его технологических особенностей и требований безопасности.

Этот раздел является неотъемлемой частью проектирования электроснабжения завода и направлен на обеспечение надежного и эффективного электропитания всех производственных процессов и оборудования предприятия.

«Нагрузка в начале линии» [15]:

$$S_{p.l.} = \sqrt{(P_{p.l.} + \Delta P_T)^2 + Q_{эс}^2} . \quad (23)$$

$$S_{p.l.} = \sqrt{(16855 + 95)^2 + 8428^2} = 18929 \text{ кВА.}$$

«Расчетный ток одной цепи линии» [15]:

$$I_{p.l.} = \frac{S_{p.l.}}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot U_{ном}} . \quad (24)$$

$$I_{p.l.} = \frac{18929}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot 110} = 49 \text{ А.}$$

«Ток в послеаварийном режиме (в случае питания все нагрузки по одной цепи линии)» [15]:

$$I_{п.} = 2 \cdot I_{p.l.} . \quad (25)$$

$$I_{п.} = 2 \cdot 49 = 98 \text{ А.}$$

«Сечение проводов находим по экономической плотности тока» [15]:

$$F_3 = \frac{I_{п.}}{j_3} . \quad (26)$$

где j_3 – экономическая плотность тока, А/мм² [10].

$$F_3 = \frac{49}{1,1} = 45 \text{ мм}^2 .$$

«Окончательно принимается провод марки АС–3х120/19.

Потери активной энергии в проводах линии за год» [15]:

$$\Delta A_{л} = n \cdot (3 \cdot I_{p.л.}^2 \cdot r_0 \cdot L \cdot \tau); \quad (27)$$

где r_0 – «удельное активное сопротивление ВЛ, Ом/км» [15];

L – «расстояние от ПС энергосистемы до ГПП, км» [15].

$$\Delta A_{л.} = 2 \cdot (3 \cdot 49^2 \cdot 0,43 \cdot 6,5 \cdot 3367) = 79 \frac{\text{МВт} \cdot \text{ч}}{\text{год}}.$$

3.2.3 Расчет токов короткого замыкания в питающей сети

Расчет токов КЗ в питающей сети является ключевым этапом в проектировании системы электроснабжения завода по производству беспилотных летательных аппаратов. Точный расчет токов КЗ необходим для обеспечения безопасности электрооборудования, определения параметров защиты и выбора соответствующего оборудования для аварийной ситуации.

«Цель данного раздела заключается в определении максимальных токов КЗ в питающей сети завода и оценке их воздействия на оборудование, системы защиты и стабильность работы электроснабжения. Этот раздел является важным этапом в обеспечении надежности и безопасности электроснабжения завода и направлен на предотвращение аварийных ситуаций и минимизацию рисков для персонала и оборудования.

Исходная схема и схема замещения для расчёта токов КЗ представлена на рисунке 4» [15].

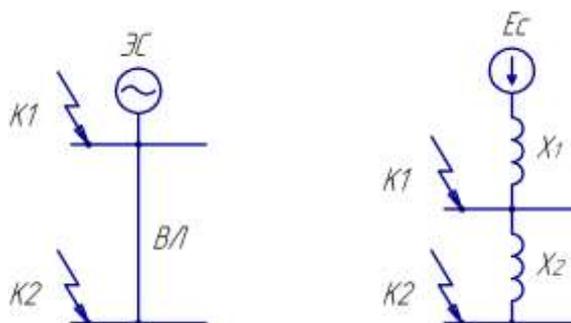


Рисунок 4 – Схема для расчёта токов КЗ

«Определяется сопротивление элементов схемы замещения.
Сопротивление системы» [15].

$$x_1 = x_c = \frac{S_6}{S_k}. \quad (28)$$

где S_6 – базисная мощность, МВА;

S_k – мощность КЗ, МВА.

$$x_1 = x_c = \frac{1000}{2520} = 0,40.$$

«Ток КЗ в точке K_1 » [15]:

$$I_{k1} = I_{пт1} = I_{п01} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6 \cdot x_1}. \quad (29)$$

$$I_{k1} = I_{пт1} = I_{п01} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115 \cdot 0,40} = 12,7 \text{ кА.}$$

«Ударный ток КЗ в точке 1» [15]:

$$i_{уд1} = \sqrt{2} \cdot k_{уд1} \cdot I_{k1}. \quad (30)$$

где $k_{уд}$ – ударный коэффициент [11],

$$i_{уд1} = \sqrt{2} \cdot 1,72 \cdot 12,7 = 30,8 \text{ кА.}$$

«Сопротивление ВЛ» [15]:

$$x_2 = \frac{x_0 \cdot L \cdot S_6}{U_6^2}. \quad (31)$$

где x_0 – «удельное реактивное сопротивление ВЛ, Ом/км» [15];

U_6 – базисное напряжение, В.

$$x_2 = \frac{0,43 \cdot 6,5 \cdot 1000}{115^2} = 0,22.$$

Ток КЗ в точке К2

$$I_{k2} = I_{пт2} = I_{п02} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6 \cdot (x_1 + x_2)}. \quad (32)$$

$$I_{k2} = I_{пт2} = I_{п02} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115 \cdot (0,40 + 0,22)} = 8,2 \text{ кА.}$$

Ударный ток определяется аналогично расчетам для т.1 и составляет 20,8 кА.

В ходе выполнения расчета токов КЗ в питающей сети завода по производству БПЛА получены важные результаты, определяющие безопасность и надежность работы электроснабжения предприятия. Используются математические модели для расчета токов КЗ в различных участках сети при различных условиях. Эти расчеты дали представление о максимальных значениях токов КЗ, которые могут возникнуть в сети в случае аварийных ситуаций.

3.2.4 Выбор электрооборудования

Цель данного раздела настоящей выпускной квалификационной работы «(ВКР) состоит в детальном рассмотрении процесса выбора и обосновании применения электрооборудования напряжением 110 кВ для главной понизительной подстанции (ГПП) на заводе по производству БПЛА» [27]. Учитывая специфику производственных процессов и требования к непрерывности и стабильности электроснабжения, особое внимание уделяется

не только техническим параметрам оборудования, но и его соответствию стандартам безопасности и нормам эксплуатации. «В рамках данного раздела будут рассмотрены основные критерии выбора электрооборудования, проанализированы возможные альтернативы и обоснованы конкретные решения, направленные на обеспечение надежной и эффективной работы системы электроснабжения завода по производству БПЛА» [27].

Выключатели элегазовые напряжением 110 кВ предназначены для обеспечения безопасной и надежной работы электроэнергетических систем на объектах с высоким напряжением. Они выполняют ключевую функцию в системах распределения и передачи электроэнергии, позволяя эффективно управлять энергетическими потоками, переключать цепи в случае аварийных ситуаций или плановых работ, а также обеспечивать защиту от перегрузок и КЗ. Выключатели выбираются по условиям [12]:

– по номинальному напряжению

$$U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}} ; \quad (33)$$

– по номинальному току

$$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{max}} ; \quad (34)$$

где I_{max} – ток утяжеленного режима цепей питающих линий, А;

Ток утяжеленного режима цепей питающих линий

$$I_{\text{max}} = \frac{1,4 \cdot S_{\text{H}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{H}}} ; \quad (35)$$

– «по отключающей способности» [15]:

$$I_{п,\tau} \leq I_{отк.ном} ; \quad (36)$$

– по электродинамической стойкости

$$I_{п,0} < I_{пр.скв.} = I_{дин.} , \quad (37)$$

$$i_y \leq i_{пр.скв.} = i_{дин.} ; \quad (38)$$

где $I_{пр.скв.}$, $i_{пр.скв.}$ – «действующее и амплитудное значения предельного сквозного тока КЗ, А;

– по возможности отключения аperiodической составляющей тока КЗ $i_{а,\tau}$ в момент τ расхождения контактов по условию» [15]:

$$i_{а,\tau} \leq i_{а,ном} ; \quad (39)$$

«Аperiodическая составляющая тока КЗ вычисляется по формуле» [15]:

$$i_{а,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{п,0} \cdot e^{-\frac{\tau}{T_a}} , \quad (40)$$

где τ – «время от начала КЗ до прекращения соприкосновения контактов, с» [15];

T_a – «постоянная времени затухания аperiodической составляющей КЗ» [11].

Расчетное время

$$\tau = t_{р.з.мин} + t_{с.в} , \quad (41)$$

где $t_{р.з.мин}$ – «минимальное время действия релейной защиты, с;

$t_{с.в}$ – собственное время отключения выключателя, с» [15].

«Завод–изготовитель гарантирует выключателю аperiodическую составляющую в отключаемом токе для времени τ » [2]:

$$i_{a,ном} = \sqrt{2} \cdot \beta_n \cdot I_{отк,ном}. \quad (42)$$

– «по термической стойкости к тепловому импульсу тока КЗ» [15]:

$$W_k \leq I_{тер}^2 \cdot t_{тер}, \quad (43)$$

где W_k – полный тепловой импульс КЗ, $кА^2 \cdot с$.

Полный тепловой импульс

$$W_k = I_{п,0}^2 \cdot (t_{отк} + T_a), \quad (44)$$

где $t_{отк}$ – время от начала КЗ до его отключения, с.

«Время от начала КЗ до его отключения» [15]:

$$t_{отк} = t_{р.з.} + t_{о.в.}, \quad (45)$$

где $t_{р.з.}$ – «время действия основной защиты трансформатора, с;

$t_{о.в.}$ – полное время отключения выключателя, с» [15].

«Выключатели элегазовые 110 кВ играют ключевую роль в обеспечении стабильной и безопасной работы систем электроснабжения на объектах с высоким напряжением, включая заводы по производству беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Сравнение расчетных величин и каталожных данных [2] выбранных выключателей представлено в таблице 5» [15].

Таблица 5 – Выбор выключателей

Условия выбора	Расчетные данные	Каталожные данные ВЭБ–110–40/1250
$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{уст}}$	$U_{\text{уст}} = 110,0 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 110,0 \text{ кВ}$
$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{мах}}$	$I_{\text{мах}} = 98 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 1250,0 \text{ А}$
$I_{\text{отк.ном}} \geq I_{\text{п,т}}$	$I_{\text{п,0}} = 12,7 \text{ кА}$	$I_{\text{отк}} = 40,0 \text{ кА}$
$i_{\text{а,ном}} \geq i_{\text{а,т}}$	$i_{\text{а,т}} = 5,1 \text{ кА}$	$i_{\text{а,ном.}} = 22,6 \text{ кА}$
$I_{\text{пр.скв.}} \geq I_{\text{п,0}}$	$I_{\text{п,0}} = 12,7 \text{ кА}$	$I_{\text{пр.скв.}} = 40,0 \text{ кА}$
$i_{\text{пр.скв.}} \geq i_{\text{дин.}}$	$i_{\text{у}} = 30,5 \text{ кА}$	$i_{\text{д}} = 102,0 \text{ кА}$
$I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} \geq B_{\text{к}}$	$B_{\text{к}} = 430,6 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$4800 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

Разъединители напряжением 110 кВ предназначены для обеспечения безопасной и эффективной работы систем электроснабжения на объектах с высоким напряжением. Они выполняют ряд важных функций, направленных на обеспечение надежности и безопасности работы электроэнергетических систем:

- «изоляция участков сети: разъединители используются для физической разрыва цепей электроснабжения, что позволяет изолировать отдельные участки сети для проведения технического обслуживания, ремонта или замены оборудования без необходимости отключения всей электросети;
- предотвращение электрических аварий: в случае возникновения нештатных ситуаций, таких как короткие замыкания или перегрузки, разъединители могут использоваться для быстрого и безопасного отключения участков сети, что помогает предотвратить повреждения оборудования и обеспечить безопасность персонала;
- поддержание безопасных условий для обслуживания: разъединители обеспечивают возможность проведения технического обслуживания, ремонта и проверки оборудования при отключенной электроподаче, что позволяет обслуживающему персоналу работать в безопасных условиях, минимизируя риск получения электрических травм;
- управление электроэнергией» [28]: разъединители могут

использоваться для управления энергопотоками в электросети, например, для переключения между различными источниками электропитания или для изменения конфигурации сети в соответствии с операционными потребностями.

Таким образом, разъединители напряжением 110 кВ играют важную роль в обеспечении надежной и безопасной работы систем электроснабжения, включая их применение на заводах по производству беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), где требования к безопасности и непрерывности электроснабжения особенно высоки. «Разъединители выбираются, согласно условиям:

- по конструкции, роду установки;
- по номинальному напряжению» [12]

$$U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}} ; \quad (46)$$

- по номинальному току

$$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{max}} ; \quad (47)$$

- по электродинамической стойкости:

$$I_{\text{п,0}} < I_{\text{пр.скв.}} = I_{\text{дин.}} , \quad (48)$$

$$i_y \leq i_{\text{пр.скв.}} = i_{\text{дин.}} ; \quad (49)$$

- по термической стойкости:

$$B_k \leq I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} ; \quad (50)$$

«Сравнение расчетных величин и каталожных данных выбранных

разъединителей представлено в таблице 6» [17].

Таблица 6 – Выбор разъединителей

Условия выбора	Расчетные данные	Каталожные данные РГ–110/1000УХЛ1
$U_{ном} \geq U_{уст}$	$U_{уст} = 110,0$ кВ	$U_{ном} = 110$ кВ
$I_{ном} \geq I_{мах}$	$I_{мах} = 98$ А	$I_{ном} = 1000$ А
$i_{пр.скв.} \geq i_{дин.}$	$i_y = 30,8$ кА	$i_y = 100$ кА
$I_{тер}^2 \cdot t_{тер} \geq B_k$	$B_k = 430,6$ кА ² ·с	4800 кА ² ·с

«С целью учета потерь электроэнергии в силовых трансформаторах ГПП предприятия принимаем решение установить приборы учета на стороне ВН. Счетчики электроэнергии подключаются ко вторичным обмоткам ТТ и ТН.

Выбор трансформаторов напряжения представим в таблице 7» [22].

Таблица 7 – Выбор трансформаторов напряжения

Прибор и место его установки		Тип	Мощ–ть одной обм–ки, ВА	Число обм–к	cos φ	sin φ	Число приборов	Общая мощность	
								P ₂ , Вт	Q ₂ , вар
W	Цепи питающих, линий	Д–335	1,5	2	1,0	0,0	1	3,0	–
var		Д–335	1,5	2	0,0	1,0	1	–	3,0
РІК		СЭТ–4ТМ. 03М	1,5	2	0,8	0,6	1	0,8	0,6
Итого								3,8	3,6
ЗНОГ–110У1 [19]								S _{2Σ} = 5,2 ВА	
U _{Іном} = 110 кВ									
S _{2,кл.т.чн.0,5} = 300 ВА		S _{2,кл.т.чн.0,5} = 3 · 100 = 300 > S _{2Σ}							

«Для обеспечения защиты оборудования ГПП предприятия от перенапряжений» [27] используются специализированные устройства и системы. Они предназначены для предотвращения повреждений и неполадок, вызванных возникающими в электросети перенапряжениями, которые могут возникнуть в результате различных факторов, таких как молния, коммутационные процессы, скачки напряжения и т.д. Выбираются

ограничители перенапряжения ОПН–110/56 и ОПН–110/88 [9].

Выводы по разделу 3.

В третьем разделе выпускной квалификационной работы проведен выбор и расчет числа и мощности трансформаторов. Выбраны трансформаторы цеховых ТП. Приведен план предприятия с расположением выбранных ТП и питающей ВЛ. Рассчитана система внешнего электроснабжения предприятия. В процессе анализа и обоснования выбора электрооборудования напряжением 110 кВ для ГПП были рассмотрены различные аспекты, включая технические характеристики оборудования, соответствие стандартам безопасности, эксплуатационные особенности и экономические факторы. На ГПП предприятия принимаются к установке трансформаторы ТДН–16000/110/10. Рассчитаны токи КЗ. Для установки на ОРУ предприятия устанавливаются выключатели ВЭБ–110–40/1250, разъединители РГ–110/1000УХЛ1, ограничители перенапряжения: в нейтрали ОПН–110/56, в питающей линии ОПН–110/88. Выбранное электрооборудование обладает необходимыми техническими характеристиками, обеспечивающими стабильную и надежную работу системы электроснабжения на заводе. Это включает в себя высокую надежность, эффективность, а также возможность интеграции с другими компонентами электроэнергетической системы. Выбор электрооборудования для ГПП предприятия играет ключевую роль в обеспечении непрерывной и безопасной работы электроэнергетической системы, а обоснованный подход к этому выбору позволяет достичь оптимального баланса между техническими и экономическими аспектами.

4 Расчет токов короткого замыкания

«Раздел, посвященный расчету токов короткого замыкания (ТКЗ) на предприятии, представляет собой важный этап в проектировании системы электроснабжения. Расчет ТКЗ необходим для определения максимальных токов, которые могут возникнуть в случае коротких замыканий в электрических сетях. Это позволяет корректно выбрать защитные устройства, определить необходимые сечения проводов и оборудование, а также обеспечить безопасность оборудования и персонала предприятия» [28].

В данном разделе будут рассмотрены основные методы и подходы к расчету ТКЗ на предприятии по производству беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Учитывая специфику электротехнических систем и требования к непрерывности работы на предприятии, особое внимание будет уделено анализу различных сценариев коротких замыканий, а также оценке их влияния на оборудование и безопасность работы.

Схема для расчёта токов КЗ представлена на рисунке 5» [9].

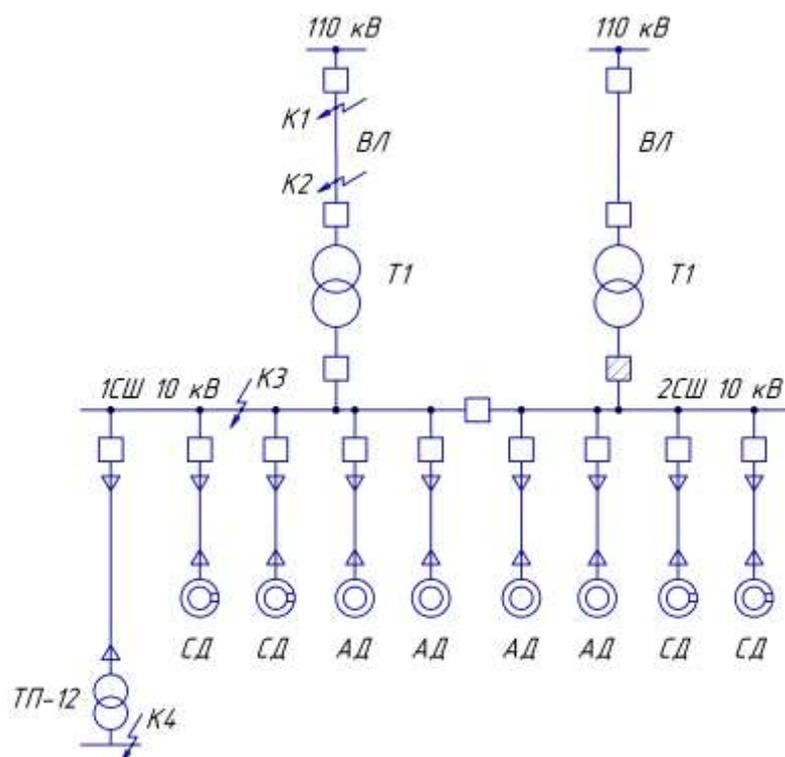


Рисунок 5 – Схема для расчетов токов КЗ

«Расчёт токов КЗ производим в следующих точках:

- K_1 и K_2 – в схеме внешнего электроснабжения;
- K_3 – в РУ 10 кВ ГПП;
- K_4 – в сети напряжением 0,4 кВ.

Для расчета токов КЗ по схеме электроснабжения предприятия (рисунок 5) составляется схема замещения (рисунок 6)» [9].

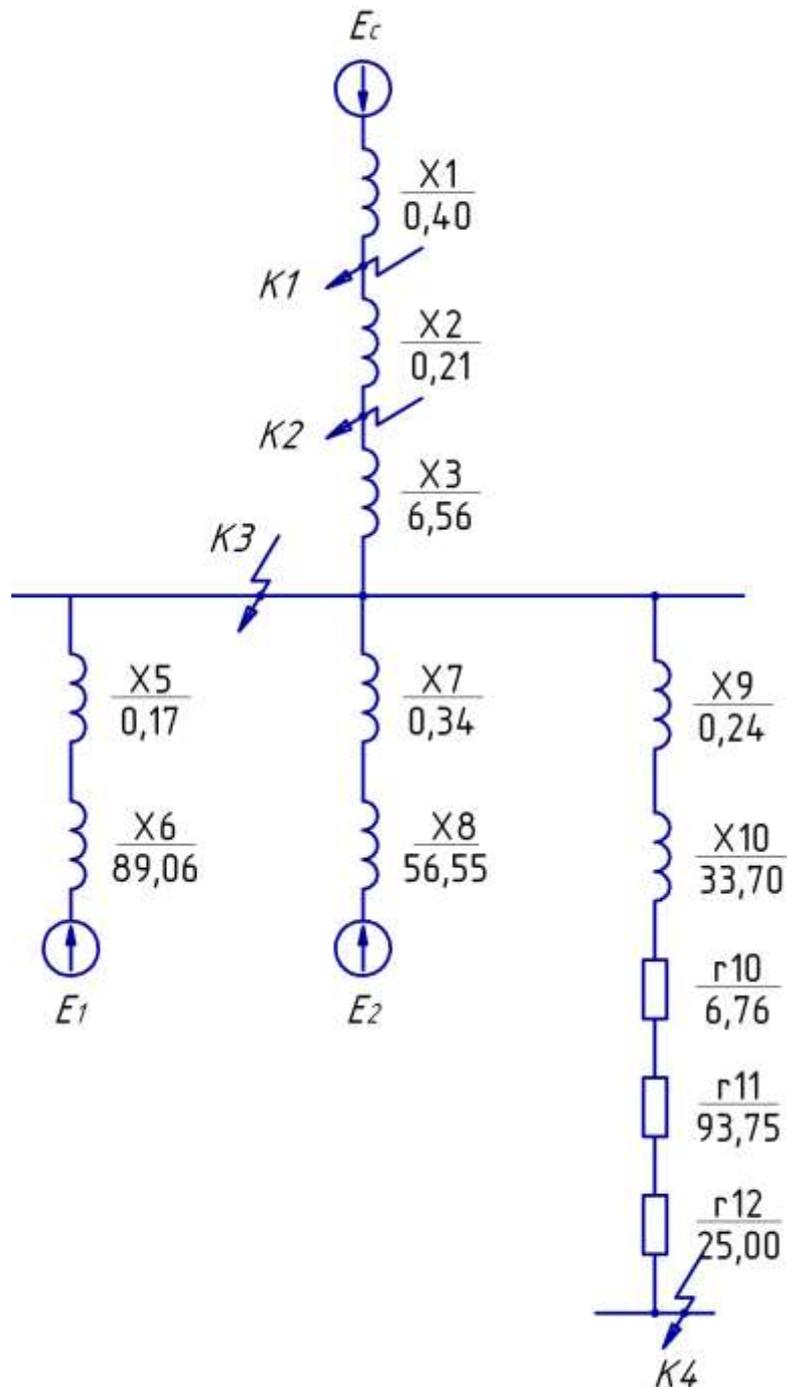


Рисунок 6 – Схема замещения для токов КЗ

«Определяются параметры схемы замещения в относительных единицах при $S_6 = 1000$ МВА и, принимая за базисное напряжение той ступени, на которой произошло КЗ.

Сопротивление системы» [9]:

$$x_1 = x_c = \frac{S_6}{S_c}, \quad (51)$$

где S_c – мощность КЗ на шинах системы, МВА.

$$x_1 = x_c = \frac{1000}{2520} = 0,40.$$

«Сопротивление воздушных линий (ВЛ)» [9]:

$$x_2 = x_{л} = x_{0\text{вл}} \cdot L_{\text{вл}} \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср1}}^2}, \quad (52)$$

где $U_{\text{ср1}}$ – «среднее напряжение ВЛ, кВ;

$L_{\text{вл}}$ – длина ВЛ, км;

$x_{0\text{вл}}$ – удельное реактивное сопротивление ВЛ, Ом/км;

S_6 – базисная мощность, МВА» [9].

$$x_2 = x_{л} = 0,44 \cdot 6,5 \cdot \frac{1000}{115^2} = 0,22.$$

«Сопротивление трансформатора ГПП» [9]:

$$x_{т} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{н.т}}, \quad (53)$$

где U_k – напряжение КЗ;

$S_{н.т}$ – номинальная мощность трансформатора, кВА.

$$X_T = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{1000}{16} = 6,56$$

Сопротивление КЛ:

$$X_{кл} = \frac{1}{n_{кл}} \cdot x_{0кл} \cdot L_{кл} \cdot \frac{S_б}{U_{ср2}^2}, \quad (54)$$

где $n_{кл}$ – «число запараллеленных КЛ, шт.;

$x_{0кл}$ – удельное реактивное сопротивление КЛ, Ом/км;

$L_{кл}$ – длина КЛ, км;

$U_{ср2}$ – среднее напряжение КЛ, кВ» [9].

$$x_5 = \frac{1}{1} \cdot 0,14 \cdot 0,136 \cdot \frac{1000}{10,5^2} = 0,17.$$

«Аналогичным образом рассчитываются сопротивления остальных кабельных линий, результаты расчета представлены в таблице 8» [9].

Таблица 8 – Расчет сопротивлений КЛ

Параметр	x_5	x_7	x_9
x_0 , Ом/км	0,14	0,14	0,14
L , км	0,136	0,268	0,0186
x , о.е.	0,17	0,34	0,24

«Сопротивление синхронных двигателей» [9]:

$$X_d = \frac{1}{n_d} \cdot \frac{1}{I_{пуск}} \cdot \frac{S_б \cdot \cos \varphi \cdot \eta}{P_d}, \quad (55)$$

где $I_{\text{пуск}}$ – «кратность пускового тока двигателя;

$P_{\text{д}}$ – номинальная активная мощность двигателя, кВт» [9],

$$x_6 = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{5} \cdot \frac{1000 \cdot 10^3 \cdot 0,75 \cdot 0,9}{400} = 89,06,$$

$$x_8 = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{5} \cdot \frac{1000 \cdot 10^3 \cdot 0,75 \cdot 0,9}{630} = 56,55.$$

«В сети напряжением ниже 1 кВ необходимо учитывать активные сопротивления.

Полное сопротивление трансформатора цеховой ТП–6» [9]:

$$z_{\text{T}} = \frac{U_{\text{k}}}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{н.т}}}. \quad (56)$$

где U_{k} – «напряжение КЗ, %;

$S_{\text{н.т}}$ – номинальная мощность трансформатора, ВА» [9].

$$z_{10} = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{1000 \cdot 10^3}{1600} = 34,38. \quad (57)$$

«Активное сопротивление трансформатора» [9]:

$$r_{\text{T}} = \Delta P_{\text{k}} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{н.т}}^2}, \quad (58)$$

где ΔP_{k} – потери КЗ трансформатора, Вт.

$$r_{10} = 17,3 \cdot \frac{1000}{1600^2} = 6,76.$$

«Индуктивное сопротивление трансформатора» [9]:

$$x_T = \sqrt{z_T^2 - r_T^2}. \quad (59)$$

$$x_{10} = \sqrt{34,38^2 - 6,76^2} = 33,70.$$

«Для распределительных устройств цеховых ТП переходное сопротивление контактов можно принять $r_k = 0,015$ Ом, тогда» [11]:

$$r_{11} = r_k \cdot \frac{S_6}{U_6^2}. \quad (60)$$

$$r_{11} = 0,015 \cdot \frac{1000}{0,4^2} = 93,75.$$

Активное сопротивление дуги в месте КЗ

$$r_{12} = r_d \cdot \frac{S_6}{U_6^2}. \quad (61)$$

$$r_{12} = 0,004 \cdot \frac{1000}{0,4^2} = 25,00.$$

«Для расчета тока КЗ в точке К₃ приведем схему замещения (рисунок б) к виду рисунка 7.

Сопротивления элементов, представленных на схеме замещения, изображенной на рисунке 7, определяются по выражениям» [9]:

$$X_{13} = X_1 + X_2 + X_3. \quad (62)$$

$$X_{14} = X_5 + X_6. \quad (63)$$

$$X_{15} = X_7 + X_8. \quad (64)$$

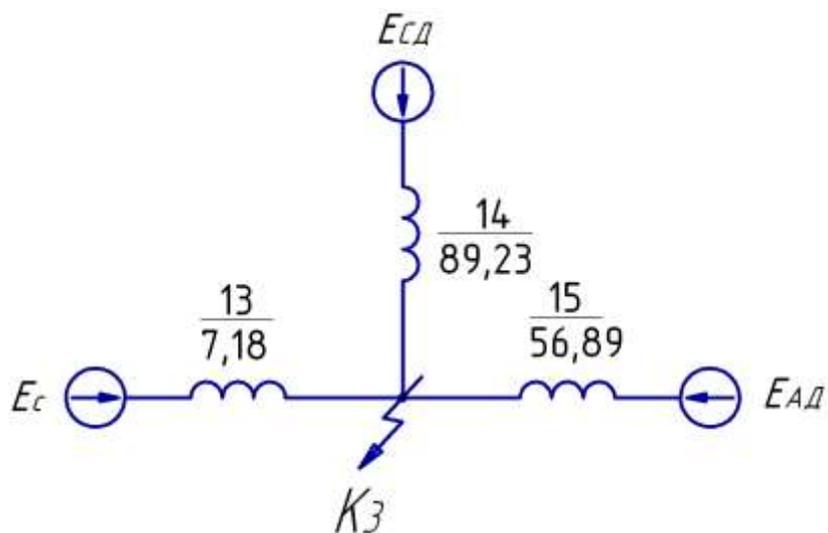


Рисунок 7 – Схема замещения для расчета КЗ в точке К3

$$x_{13} = 0,40 + 0,21 + 6,56 = 7,18,$$

$$x_{14} = 0,17 + 89,06 = 89,23,$$

$$x_{15} = 0,34 + 56,55 = 56,89.$$

Базисный ток

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6}, \quad (65)$$

$$I_6 = \frac{1000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 55 \text{ кА.}$$

«Начальные значения сверхпереходного тока каждой ветви» [9]:

$$I_c = \frac{E_c}{x_{15}} \cdot I_6. \quad (66)$$

$$I_{сд} = \frac{E_1}{x_{14}} \cdot I_6. \quad (67)$$

$$I_{ад} = \frac{E_1}{x_{15}} \cdot I_6. \quad (68)$$

$$I_c = \frac{1}{7,18} \cdot 55 = 7,7 \text{ кА.}$$

$$I_{\text{сД}} = \frac{1,1}{89,24} \cdot 55 = 0,7 \text{ кА.}$$

$$I_{\text{АД}} = \frac{0,9}{56,89} \cdot 55 = 0,9 \text{ кА.}$$

«Начальное значение тока КЗ в точке К₃» [9]:

$$I_{\text{кз3/0/}} = I_c + I_{\text{сД}} + I_{\text{АД}}. \quad (69)$$

$$I_{\text{кз3/0/}} = 7,7 + 0,7 + 0,9 = 9,2 \text{ кА.}$$

Ударный ток КЗ:

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_k, \quad (70)$$

где $k_{\text{уд}}$ – ударный коэффициент [11],

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot 1,92 \cdot 9,2 = 24,8 \text{ кА.}$$

Мощность КЗ в точке К₃

$$S_{\text{кз3}} = \sqrt{3} \cdot U_6 \cdot I_k. \quad (71)$$

$$S_{\text{кз3}} = \sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 9,2 = 168 \text{ МВА.}$$

«Определяется ток КЗ в точке К₄.

Суммарное активное сопротивление» [9]:

$$r_{\Sigma} = r_{10} + r_{11} + r_{12}. \quad (72)$$

$$r_{\Sigma} = 6,76 + 93,75 + 25,00 = 125,5.$$

Суммарное индуктивное сопротивление

$$x_{\Sigma} = x_9 + x_{10} + x_{13}. \quad (73)$$

$$x_{\Sigma} = 0,24 + 33,70 + 7,18 = 41,1.$$

Полное сопротивление

$$z_{\Sigma} = \sqrt{r_{\Sigma}^2 + x_{\Sigma}^2}. \quad (74)$$

$$z_{\Sigma} = \sqrt{125,5^2 + 41,1^2} = 132,1.$$

Мощность КЗ в точке К₄

$$S_{кз4} = \frac{S_6}{z_4}. \quad (75)$$

$$S_{кз4} = \frac{1000}{132,1} = 7,6 \text{ МВА.}$$

«Ток КЗ при базисном напряжении $U_6 = 0,4 \text{ кВ}$ » [9]:

$$I_{к4} = \frac{S_{к4}}{\sqrt{3} \cdot U_6}. \quad (76)$$

$$I_{к4} = \frac{7,6}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 10,9 \text{ кА.}$$

«Ударный ток КЗ в точке К₄» [9]:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_k, \quad (77)$$

где $k_{уд}$ – ударный коэффициент [11].

$$i_{уд4} = \sqrt{2} \cdot 1,6 \cdot 10,9 = 24,7 \text{ кА.}$$

Выводы по разделу 4.

В четвертом разделе ВКР рассчитаны токи КЗ в РУ 10 кВ ГПП предприятия, а также на стороне 0,4 кВ цеховых ТП. В ходе расчетов были использованы методы симметричных составляющих и расчет максимального значения ударного тока с использованием типовых кривых. Также были учтены активные и индуктивные сопротивления элементов схемы, а также коэффициенты трансформации трансформаторов. Полученные значения токов КЗ позволяют оценить способность оборудования и проводников выдерживать кратковременные перегрузки, а также проверить эффективность работы устройств релейной защиты и автоматики.

5 Выбор и расчет электрических аппаратов и проводников

Раздел, посвященный выбору и расчету кабелей на предприятии, является важной составляющей проектирования электроэнергетической системы. Выбор правильных кабелей играет ключевую роль в обеспечении надежной передачи электроэнергии, минимизации потерь и «обеспечении безопасности эксплуатации оборудования».

В данном разделе будет проведен анализ требований к кабельным линиям на заводе по производству БПЛА с учетом особенностей производственного процесса и электротехнических характеристик оборудования» [1]. Будут рассмотрены различные типы кабелей, их технические характеристики, а также особенности применения в зависимости от конкретных условий эксплуатации.

Основная цель данного раздела заключается в обеспечении оптимального выбора кабельных линий, учитывающего требования эффективности, надежности и экономичности. Проведенный анализ и расчет кабелей позволит определить необходимые сечения, длины и типы кабельной продукции для обеспечения надежной работы электроэнергетической системы завода по производству БПЛА. Полученные результаты послужат основой для выбора оптимального оборудования и разработки проектных решений с целью обеспечения эффективной и безопасной работы электроснабжения на предприятии.

«Расчетный ток, протекающий по кабельной линии в нормальном режиме» [1]:

$$I_{p.k} = \frac{S_{p.k}}{\sqrt{3} \cdot U_n} \quad (78)$$

где $S_{p.k}$ – «мощность, передаваемая по КЛ в нормальном режиме» [9].

«Например, расчетный ток, протекающий по кабельной линии, питающей ТП1, определяется по расчетной нагрузке приходящейся на один трансформатор» [9]:

$$I_{p.k.1} = \frac{1}{N_T} \cdot \frac{\sqrt{(P_p + \Delta P_T)^2 + (Q_1 + \Delta Q_T)^2}}{\sqrt{3} \cdot U_H} \quad (79)$$

где P_p , Q_1 – «расчетная нагрузка ТП;

ΔP_T , ΔQ_T – потери в трансформаторах ТП;

N_T – количество трансформаторов в ТП» [9];

$$I_{p.k.1} = \frac{\sqrt{258^2 + 200^2}}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 18 \text{ А.}$$

«Сечение КЛ, определяемое по экономической плотности тока» [9]:

$$F_3 = \frac{I_{p.k.}}{j_3}, \quad (80)$$

где j_3 – «экономическая плотность тока, А/мм²» [9].

«Для кабелей с алюминиевыми жилами и изоляцией из сшитого полиэтилена при $T_m = 4960$ ч/год экономическая плотность тока равна $j_3=1,7$ А/мм², тогда» [5]:

$$F_{31} = \frac{18}{1,7} = 11 \text{ мм}^2.$$

«Принимается кабель типа АПвПуг–10 3x16 с параметрами: $I_{доп1}=95$ А, $r_0=1,94$ Ом/км, $x_0=0,113$ Ом/км. Фактический допустимый ток кабеля с учетом условий его прокладки равен» [9]:

$$I_{\text{доп.ф}} = K_{\text{п}} \cdot K_{\text{т}} \cdot I_{\text{доп}} > \frac{I_{\text{р.к.}}}{n_{\text{к}}}; \quad (81)$$

где $K_{\text{п}}$ – «поправочный коэффициент на число параллельно прокладываемых кабелей» [7];

$K_{\text{т}}$ – «поправочный коэффициент на температуру среды, в которой прокладывается кабель;

$n_{\text{к}}$ – число запараллеленных кабелей в КЛ» [7].

$$I_{\text{доп.ф.1}} = 0,85 \cdot 1,01 \cdot 95 = 82 > 18 \text{ А.}$$

«Под послеаварийным режимом КЛ будем понимать режим, когда выходит из строя одна из двух кабельных линий, питающих потребители 2–й категории, при этом нагрузка на линию удваивается, тогда» [24]:

$$I_{\text{ав}} = 2 \cdot I_{\text{р.к.}} \quad (82)$$

$$I_{\text{ав1}} = 2 \cdot 18 = 36 \text{ А.}$$

«Допустимая перегрузка кабеля в послеаварийном режиме» [24]:

$$I'_{\text{ав}} = K_{\text{ав}} \cdot I_{\text{доп.ф}}, \quad (83)$$

где $K_{\text{ав}}$ – «коэффициент перегрузки, определяется в зависимости от коэффициента предварительной нагрузки K_3 » [24];

$$K_3 = \frac{I_{\text{р.к.}}}{I'_{\text{доп}}}. \quad (84)$$

$$K_3 = \frac{18}{82} = 0,26.$$

$$I'_{\text{ав}} = 1,25 \cdot 82 = 102 \text{ А.}$$

«Осуществляется проверка по току перегрузки» [24]:

$$I'_{ав} \geq \frac{I_{ав}}{n_k}, \quad (85)$$

$$102 \geq 36 \text{ А.}$$

«Для остальных кабелей расчет выполняется аналогично. Результаты расчета сведены в таблицу 9.

Потеря напряжения в кабельной линии» [24]:

$$\Delta U = \frac{P_p \cdot r_0 \cdot L + Q_1 \cdot x_0 \cdot L}{n_k \cdot U_n^2} \cdot 100\% \leq \Delta U_{доп} = 5\%, \quad (86)$$

где r_0 и x_0 – «удельные активное и индуктивное сопротивления кабеля, Ом/км» [24];

L – длина кабельной линии, км.

$$\Delta U_1 = \frac{258 \cdot 1,94 \cdot 0,233 + 200 \cdot 0,113 \cdot 0,233}{1 \cdot 10^5} \cdot 100\% = 0,12 < 5\% .$$

«На этом предварительный расчет кабельных линий для нормального и аварийного режимов заканчивается. Полученные сечения кабелей используются при расчете токов КЗ, после которого определяется сечение кабеля F_T по термической стойкости к токам КЗ.

Расчет кабельных линий представлен в таблице 9» [23].

Таблица 9 – Результаты расчета кабельных линий

Конечные пункты КЛ	P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА	I_{PK} , А	F_{Σ} , мм ²	$F_{ст}$, мм ²	Тип кабеля	Способ прокл.	$I_{па}$, А	$I_{доп}$, А	$K_{л}$	K_t	$\Gamma_{доп}$, А	$K_{ав}$	$\Gamma_{ав}$, А	L , км	r_0 , Ом/км	x_0 , Ом/км	ΔU , %
ГПП–ТП1	258	200	326	18	11	16	2хАПвПуг–10 (3х16)	в траншее	36	95	0,85	1,01	82	1,25	102	0,233	1,940	0,113	0,12
ГПП–ТП2	214	211	301	17	10	16	АПвПуг–10 (3х16)	в траншее	–	95	0,85	1,01	82	–	–	0,158	1,940	0,113	0,07
ГПП–ТП3	495	451	670	37	22	25	2хАПвПуг–10 (3х25)	в траншее	74	115	0,85	1,01	99	1,25	123	0,152	1,250	0,099	0,10
ГПП–ТП4	912	902	1282	71	42	50	2хАПвПуг–10 (3х50)	в траншее	141	159	0,90	1,01	145	1,25	181	0,032	0,620	0,090	0,02
ТП4–ТП5	456	451	641	35	21	25	2хАПвПуг–10 (3х25)	в траншее	71	115	0,93	1,01	108	1,25	135	0,051	1,250	0,099	0,03
ГПП–ТП6	1648	1865	2489	137	81	120	2хАПвПуг–10 (3х120)	в траншее	274	291	0,85	1,01	250	1,25	312	0,025	0,258	0,081	0,01
ТП6–ТП7	824	933	1245	69	40	50	2хАПвПуг–10 (3х50)	в траншее	137	159	0,85	1,01	137	1,25	171	0,072	0,620	0,090	0,04
ГПП–ТП8	1359	1663	2147	118	70	95	2хАПвПуг–10 (3х95)	на лотках	236	255	0,90	1,03	236	1,25	295	0,122	0,326	0,083	0,07
ТП8–ТП9	679	832	1074	59	35	35	2хАПвПуг–10 (3х35)	на лотках	118	140	0,90	1,03	130	1,25	162	0,061	0,089	0,095	0,01
ГПП–ТП10	1722	1903	2566	141	83	120	2хАПвПуг–10 (3х120)	в траншее	283	291	0,87	1,01	256	1,25	320	0,118	0,258	0,081	0,07
ТП10–ТП11	861	952	1283	71	42	50	2хАПвПуг–10 (3х50)	в траншее	141	159	0,87	1,01	140	1,25	175	0,098	0,620	0,090	0,06
ГПП–ТП12	961	1130	1483	82	48	50	АПвПуг–10 (3х50)	в траншее	–	159	0,90	1,01	145	–	–	0,245	0,620	0,090	0,17
ГПП–АД	630	840	1050	58	34	35	АПвПуг–10 (3х35)	в траншее	–	140	0,85	1,01	120	–	–	0,268	0,089	0,095	0,04
ГПП–СД	400	533	667	37	22	25	АПвПуг–10 (3х25)	в траншее	–	115	0,85	1,01	99	–	–	0,166	1,250	0,099	0,09
ГПП–ПЧ	630	840	1050	58	34	35	АПвПуг–10 (3х35)	в траншее	–	140	0,85	1,01	120	–	–	0,234	0,089	0,095	0,03
ТП1–РПН1	96	87	130	188	–	185	2хААПл–1 (4х185)	в траншее	376	345	0,87	1,01	303	1,25	379	0,054	0,16	0,06	0,70
ТП1–РПН2	81	39	90	131	–	50	ААПл–1 (4х50)	в траншее	–	161	1,00	1,01	163	–	–	0,028	0,77	0,06	1,14
ТП3–РПН3	97	85	129	186	–	70	ААПл–1 (4х70)	в траншее	–	193	1,00	1,01	195	–	–	0,018	0,55	0,06	0,66
ТП11–РПН4	69	44	82	119	–	95	2хААПл–1 (4х95)	в траншее	238	235	0,93	1,01	220	1,25	275	0,048	0,41	0,06	0,93
ТП12–РПН5	103	66	123	177	–	70	ААПл–1 (4х70)	в траншее	–	193	0,93	1,01	181	–	–	0,125	0,55	0,06	4,74
ТП12–РПН6	80	76	110	159	–	50	ААПл–1 (4х50)	на лотках	–	161	1,00	1,03	166	–	–	0,065	0,77	0,06	2,69

Выводы по разделу 5.

В пятом разделе выпускной квалификационной работы выбраны электрические аппараты и проводники завода. Раздел, посвященный выбору и расчету кабелей на заводе по производству БПЛА, играет важную роль в обеспечении эффективной и надежной работы электроэнергетической системы предприятия. Анализируя различные типы кабелей и их технические характеристики, а также учитывая особенности производственного процесса, мы смогли определить оптимальные решения для обеспечения передачи электроэнергии на заводе.

В ходе проведенного исследования рассмотрены требования к кабельным линиям, их технические характеристики, а также методы расчета необходимых сечений и длин кабельных линий. Этот анализ позволил выбрать подходящие типы кабелей и определить оптимальные параметры для обеспечения надежной передачи электроэнергии на заводе.

Таким образом, результаты данного раздела послужат основой для выбора и установки кабельных линий на заводе по производству БПЛА, что обеспечит эффективную и надежную работу электроэнергетической системы предприятия.

6 Выбор основного электрооборудования и его проверка

Раздел, посвященный выбору основного электрооборудования и его проверке, является важным этапом в проектировании электроэнергетической системы предприятия. От правильного выбора оборудования зависит надежность, безопасность и эффективность работы всей электроэнергетической инфраструктуры.

В данном разделе будет рассмотрен процесс выбора основного электрооборудования для завода по производству БПЛА. Основная цель данного раздела заключается в обеспечении выбора оптимального электрооборудования, которое будет соответствовать техническим требованиям, обеспечивать стабильность и надежность работы электроэнергетической системы, а также быть экономически эффективным в эксплуатации. В процессе анализа будет уделено внимание не только техническим параметрам и характеристикам оборудования, но и его соответствию стандартам безопасности, эксплуатационным особенностям и экономическим показателям. Таким образом, результаты данного раздела послужат основой для выбора и установки основного электрооборудования на предприятии, что обеспечит надежную и безопасную работу электроэнергетической системы завода по производству БПЛА.

«Выбор ячеек комплектного распределительного устройства ГПП.

Распределительное устройство РУ 10 кВ выполняем комплектным (КРУ) со шкафами типа К–104М [6]. Тип выключателя для данных ячеек ВВЭ–10У, тип трансформаторов тока ТЛК.

Рабочий ток в утяжеленном режиме вводной ячейки определим, исходя из перегрузочной способности силовых трансформаторов ГПП» [22]:

$$I_{\max} = \frac{1,4 \cdot S_{\text{н.т.}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н.}}} \quad (87)$$

$$I_{\max} = \frac{1,4 \cdot 16000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 1231,6 \text{ А.}$$

«Тепловой импульс тока КЗ определяется по формуле» [22]:

$$B_k = I_{п,0}^2 \cdot (t_{п.з.} + t_{о.в.} + T_a), \quad (88)$$

где $t_{п.з.}$ – «время действия максимальной токовой защиты линии, с;

$t_{о.в.}$ – полное время отключения выключателя, с;

T_a – время протекания апериодической составляющей тока КЗ, с»

[22].

$$B_k = 9,2^2 \cdot (1,7 + 0,06 + 0,12) = 159,5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с.}$$

«Условия выбора, расчетные параметры сети и каталожные данные ячеек КРУ представлены в таблице 10» [8].

Таблица 10 – Выбор КРУ

Условия выбора	Расчетные параметры сети	Каталожные данные К–104М
$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{уст}}$	$U_{\text{уст}} = 10,5 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 10,5 \text{ кВ}$
$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{max}}$	$I_{\text{max}} = 1231,6 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 1600,0 \text{ А}$
$i_d \geq i_y$	$i_y = 24,8 \text{ кА}$	$i_d = 81,0 \text{ кА}$
$I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} \geq B_k$	$B_k = 159,5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} = 1200,0 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

«Выбор выключателей КРУ.

Подробный выбор выключателя на вводе в КРУ рассмотрен в таблице 11. Секционный выключатель принимается того же типа, что и вводной.

В ячейках КРУ типа К–104М устанавливаются вакуумные выключатели типа ВВЭ–10–20/1600 УЗ.

Сравнение расчетных и каталожных данных для выбранных выключателей на вводе в КРУ представим в таблице 11» [3].

Таблица 11 – Выбор выключателей на вводе в КРУ

Условия выбора	Расчетные параметры сети	Каталожные данные ВВЭ–10–20/1600 УЗ
$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{уст}}$	$U_{\text{уст}} = 10,5 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 10,5 \text{ кВ}$
$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{max}}$	$I_{\text{max}} = 1231,6 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 1600,0 \text{ А}$
$I_{\text{ном.отк}} \geq I_{\text{п,0}}$	$I_{\text{п,0}} = 9,2 \text{ кА}$	$I_{\text{ном.отк}} = 20,0 \text{ кА}$
$i_{\text{ном}} \geq i_{\text{а,τ}}$	$i_{\text{а,τ}} = 3,7 \text{ кА}$	$i_{\text{а,ном}} = 14,0 \text{ кА};$
$I_{\text{дин.}} \geq I_{\text{п,0}}$	$I_{\text{п,0}} = 9,2 \text{ кА}$	$I_{\text{дин.}} = 20,0 \text{ кА}$
$i_{\text{дин.}} \geq i_{\text{у}}$	$i_{\text{у}} = 24,8 \text{ кА}$	$i_{\text{д}} = 81,0 \text{ кА}$
$I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} \geq B_{\text{к}}$	$B_{\text{к}} = 159,5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} = 1200 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

«Выбор трансформаторов тока в ячейках КРУ.

В ячейках КРУ типа К–104М устанавливаются трансформаторы тока типа ТЛК–10–1600–0,5/10Р–УЗ [4]. Трансформатор тока в цепи секционного выключателя принимается того же типа. Условия выбора, расчетные параметры сети и каталожные данные трансформаторов тока на вводе в КРУ указаны в таблице 12» [14].

Таблица 12 – Выбор трансформаторов тока на вводе в КРУ ГПП

Условия выбора	Расчетные параметры сети	Каталожные данные ТЛК–10–1600–0,5/10Р–УЗ
$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{уст}}$	$U_{\text{уст}} = 10,5 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 10,5 \text{ кВ}$
$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{max}}$	$I_{\text{max}} = 1231,6 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 1600,0 \text{ А}$
$i_{\text{д}} \geq i_{\text{у}}$	$i_{\text{у}} = 24,8 \text{ кА}$	$i_{\text{д}} = 81,0 \text{ кА}$
$I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} \geq B_{\text{к}}$	$B_{\text{к}} = 227,4 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} = 1200,0 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

«Для проверки выбранного трансформатора тока по вторичной нагрузке составляем схему включения трансформаторов тока и измерительных приборов, представленную на рисунке 8. КИП, подключенные от выбираемых трансформаторов тока приведены в таблице 13» [22].

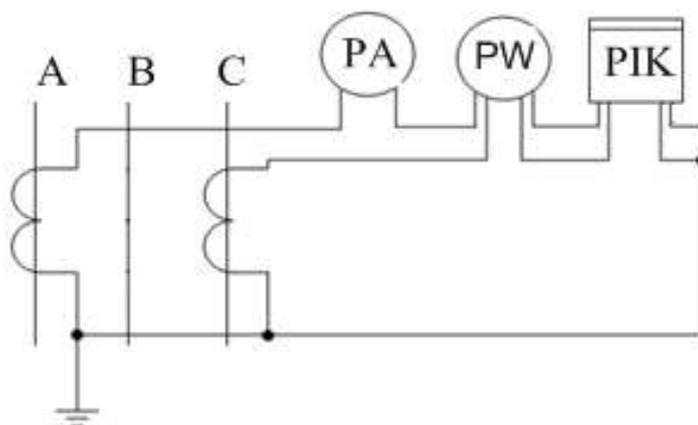


Рисунок 8 – Схема включения приборов в неполную звезду

Таблица 13 – Перечень измерительных приборов в цепи трансформаторов тока

Прибор	Тип	Класс точности	Нагрузка фазы, ВА		
			А	В	С
Амперметр	Э-335	1,0	0,5	–	–
Ваттметр	Д-335	1,5	0,5	–	0,5
Счетчик активной и реактивной энергии	СЭТ 4.ТМ.03М [18]	0,5	0,1	–	0,1
Итого			1,1	–	0,6

«Сопротивление приборов» [15]:

$$r_{\text{приб}} = \frac{S_{\text{приб}}}{I_2^2}, \quad (89)$$

$$r_{\text{приб}} = \frac{1,1}{5^2} = 0,04 \text{ Ом.}$$

«Допустимое сопротивление проводов» [15]:

$$r_{\text{пр}} = Z_{2\text{ном}} - r_{\text{приб}} - r_{\text{к}}, \quad (90)$$

где $r_{\text{к}}$ – «сопротивление контактов, Ом;

$Z_{2\text{ном}}$ – вторичная номинальная нагрузка, Ом» [15].

$$r_{\text{пр}} = 0,4 - 0,04 - 0,1 = 0,26 \text{ Ом.}$$

«Сечение соединительных проводов при соединении в неполную звезду» [22]:

$$q = \frac{\rho \cdot L_{\text{расч}}}{r_{\text{пр}}}. \quad (91)$$

$$q = \frac{0,0283 \cdot \sqrt{3} \cdot 4}{0,26} = 0,8 \text{ мм}^2.$$

«Выбор выключателей и ТТ, устанавливаемых в ячейках отходящих линий, представлен в таблице 14» [22].

«Выбор трансформаторов напряжения.

Трансформатор напряжения устанавливается один на каждую секцию сборных шин. Во вторичную обмотку трансформатора напряжения включаются катушки напряжения измерительных приборов всех присоединений данной секции и сборных шин» [22].

Таблица 14 – Выбор выключателей и ТТ

Кабельные линии	$U_{\text{ном}}$, кВ	I_{max} , А	$I_{\text{п.0}}$, кА	i_y , кА	Тип выключателя	Тип трансформатора тока
ГПП–ТП1	10,5	36	9,2	24,8	ВВЭ–10–20/630 У3	ТЛК–10–50–0,5/10Р У3
ГПП–ТП2		17				ТЛК–10–30–0,5/10Р У3
ГПП–ТП3		74				ТЛК–10–75–0,5/10Р У3
ГПП–ТП4		141				ТЛК–10–150–0,5/10Р У3
ГПП–ТП6		274				ТЛК–10–300–0,5/10Р У3
ГПП–ТП8		236				ТЛК–10–300–0,5/10Р У3
ГПП–ТП10		283				ТЛК–10–300–0,5/10Р У3
ГПП–ТП12		82				ТЛК–10–100–0,5/10Р У3
ГПП–АД		58				ТЛК–10–75–0,5/10Р У3
ГПП–СД		37				ТЛК–10–50–0,5/10Р У3
ГПП–ПЧ		58				ТЛК–10–75–0,5/10Р У3

Трансформаторы напряжения предназначены для выполнения нескольких ключевых функций в электроэнергетических системах:

- измерение напряжения: основная функция трансформаторов напряжения - измерение напряжения в электроэнергетической сети, они используются для создания пропорционального сигнала, который соответствует реальному напряжению в сети, и передачи этого сигнала на измерительные или защитные устройства;
- обеспечение изоляции: трансформаторы напряжения играют роль в обеспечении изоляции измерительных и защитных устройств от высокого напряжения в электрической сети, они предотвращают проникновение высокого напряжения в электронные или электрические системы, что может привести к повреждению оборудования и недостаточной работы защитных устройств;
- питание вспомогательных систем: в некоторых случаях трансформаторы напряжения могут использоваться для обеспечения питания вспомогательных систем или устройств, таких как освещение, сигнальные системы и другие электроприборы, которые требуют низкого напряжения для работы;
- калибровка и испытания: трансформаторы напряжения могут использоваться для калибровки и испытания измерительных приборов и оборудования, чтобы убедиться в их правильной работе и точности измерений.

Таким образом, трансформаторы напряжения являются важным компонентом в электроэнергетических системах, обеспечивая измерение напряжения, защиту оборудования и обеспечение надежной работы электрических устройств. «Трансформаторы напряжения выбирают по следующим условиям» [22]:

- по напряжению:

$$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{уст}} ; \quad (92)$$

- «по конструкции и схеме соединения обмоток;
- по классу точности.

Чтобы трансформатор напряжения работал в заданном классе точности, должно выполняться условие» [22]:

$$S_{2\text{ном}} \geq S_{\text{нагр}} ; \quad (93)$$

где $S_{\text{нагр}}$ – «мощность всех измерительных приборов и реле, присоединенных к трансформатору напряжения, ВА» [22];

$S_{2\text{ном}}$ – «номинальная мощность вторичной обмотки трансформатора напряжения в заданном классе точности, ВА» [22].

«Трансформатор напряжения присоединяется к сборным шинам через предохранитель типа ПKN001–10У3и втычной разъединитель.

Выбор трансформаторов напряжения, устанавливаемых в ячейках КРУ, представлен в таблице 15» [22].

Таблица 15 – Выбор трансформаторов напряжения

Прибор и место его установки		Тип	Мощность одной обм–ки, ВА	Число обм–к	cos φ	sin φ	Число приборов	Общая мощность	
								P ₂ , Вт	Q ₂ ,вар
PV	Секция СШ	Э–335	2,0	1	1,00	0,00	2	4	–
PW	Цепь силового тр–ра	Д–335	1,5	2	1,00	0,00	1	3	–
РК	Цепь силового трансформатора и отходящих линий	СЭТ 4.ТМ	3,0	2	0,38	0,93	15	23	22
Итого								30	22
НАЛИ–СЭЦ–10У3 [21]		Трехфазный трансформатор напряжения						S _{2Σ} = 37 ВА	

«Проверка кабелей напряжением 10 кВ на термическую стойкость к токам КЗ.

Проверка кабелей напряжением 10 кВ на термическую стойкость к токам КЗ» [22] является важным этапом в обеспечении безопасности и надежности работы электроэнергетической системы. Такая проверка позволяет убедиться в том, что кабели способны выдерживать тепловую нагрузку, создаваемую токами короткого замыкания, и обеспечивает безопасную и надежную работу электроэнергетической системы.

Карта селективности приведена на рисунке 9.

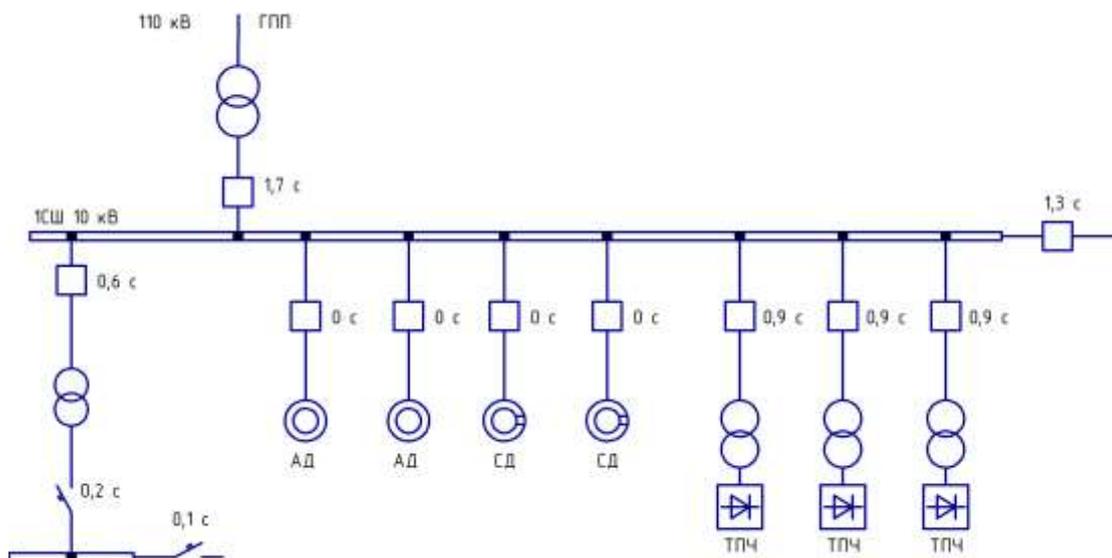


Рисунок 9 – Карта селективности

«Термически стойкое сечение» [22]:

$$F_{т.с.} = \frac{\sqrt{B_k}}{C}, \quad (94)$$

где C – «коэффициент, зависящий от вида металла жил кабеля, $\frac{A \cdot c^{1/2}}{мм^2}$ »;

B_k – тепловой импульс тока КЗ, $кА^2 \cdot с$ » [22].

$$F_{т.с.}^{ТП} = \frac{\sqrt{66,2 \cdot 10^6}}{78} = 104 \text{ мм}^2.$$

«Результаты расчетов термически стойких сечений представлен в

таблице 16» [22].

Таблица 16 – Проверка кабелей на термическую стойкость

Начало и конец кабельной линии	I_k , кА	$t_{p.z.}$, с	$t_{o.b.}$, с	T_a , с	B_k , $кА^2 \cdot с$	C , $\frac{А \cdot с^{1/2}}{мм^2}$	$F_{т.с.}$, $мм^2$
ГПП – ТП	9,2	0,6	0,06	0,12	66,2	78	104
РП1 – АД	9,2	0,0	0,06	0,12	15,3	78	50
РП2 – СД	9,2	0,0	0,06	0,12	15,3	78	50
РП3 – ПЧ	9,2	0,9	0,06	0,12	122,7	78	123

«В таблице 17 представим все кабели, для которых произведено увеличение площади сечения, выбранной по условиям нормального и утяжеленного режимов работы, до термически устойчивого сечения» [22].

Таблица 17 – Термически устойчивые сечения кабелей

Начало и конец кабельной линии	Прежняя площадь сечения кабеля, $мм^2$	Площадь термически устойчивого сечения кабеля, $мм^2$	Тип и площадь сечения нового кабеля		
ГПП–ТП1	16	120	АПвПуг–10 (3×120)		
ГПП–ТП2	16				
ГПП–ТП3	25				
ГПП–ТП4	50				
ТП4–ТП5	25				
ТП6–ТП7	50				
ГПП–ТП8	95				
ТП8–ТП9	35				
ТП10–ТП11	50				
ГПП–ТП12	50				
ГПП–АД	35			50	АПвПуг–10 (3×50)
ГПП–СД	25			50	АПвПуг–10 (3×50)
ГПП–ПЧ	35	150	АПвПуг–10 (3×150)		

«Выбор трансформаторов собственных нужд для главной понизительной подстанции (ГПП) предприятия является ключевым этапом проектирования электроснабжения и обеспечения его надежности» [22]. ГПП играет важную роль в распределении электроэнергии по всему предприятию, поэтому выбор трансформаторов должен быть тщательно продуман и соответствовать потребностям «предприятия. Выбор трансформаторов

собственных нужд для ГПП должен основываться на комплексном анализе потребностей предприятия и учитывать как технические, так и экономические аспекты для обеспечения эффективного и надежного функционирования электроснабжения. Мощность трансформатора собственных нужд, принимаем равной 0,1% от мощности силового трансформатора» [22]:

$$S_{\text{тсн}} = \frac{0,1}{100} \cdot S_{\text{н.т.}}^{\text{ГПП}} \quad (95)$$

$$S_{\text{тсн}} = \frac{0,1}{100} \cdot 16000 = 16 \text{ кВА.}$$

«Исходя из условий питания вспомогательных механизмов предприятия, выбираем два трансформатора типа ТМ–16/10, которые подключаются к обмотке НН силовых трансформаторов ГПП через предохранители типа ПКТ–101–10–16–12,5.

Выбор выключателей нагрузки в ТП.

Выключатели нагрузки не предназначены для отключения токов КЗ, поэтому их выбирают:

– по напряжению установки» [22]:

$$U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}}; \quad (96)$$

– по длительному току

$$I_{\text{норм}} \leq I_{\text{ном}}; \quad (97)$$

$$I_{\text{max}} \leq I_{\text{ном}}; \quad (98)$$

– по электродинамической стойкости

$$i_y \leq i_{\text{дин}}; \quad (99)$$

– по термической стойкости

$$I_{\text{ТЕР}}^2 \cdot t_{\text{ТЕР}} \geq B_{\text{К}}, \quad (100)$$

где $I_{\text{ТЕР}}$ – «ток термической стойкости, кА;

$t_{\text{ТЕР}}$ – время протекания тока термической стойкости, с» [22].

«Для установки на вводе в ТП применяется выключатель нагрузки ВНРП–10/400 УЗ. Расчетные и каталожные данные выключателя нагрузки для ТП–1 приведены в таблице 18» [22].

Таблица 18 – Выбор выключателя нагрузки на вводе в ТП

Условия выбора	Расчетные параметры сети	Каталожные данные ВНРП–10/400 УЗ
$U_{\text{НОМ}} \geq U_{\text{УСТ}}$	$u_{\text{УСТ}}=10$ кВ	$u_{\text{НОМ}}=10$ кВ
$I_{\text{НОМ}} \geq I_{\text{МАХ}}$	$I_{\text{МАХ}}=32,4$ А	$I_{\text{НОМ}}=400$ А
$i_{\text{ДИН}} \geq i_{\text{УД}}$	$i_{\text{УД}}=24,8$ кА	$i_{\text{ДИН}}=40$ кА
$I_{\text{ТЕР}}^2 \cdot t_{\text{ТЕР}} \geq B_{\text{К}}$	$B_{\text{К}}=227,4$ кА ² ·с	$I_{\text{ТЕР}}^2 \cdot t_{\text{ТЕР}} = 16^2 \cdot 3 = 768$ кА ² ·с

Для остальных ТП выбираются аналогичные выключатели нагрузки.

Выводы по разделу 6.

В шестом разделе выпускной квалификационной работы осуществлен выбор основного электрооборудования и его проверка. В ходе исследования были учтены технические требования и особенности производственного процесса завода, а также стандарты безопасности и нормативные требования. Выбор электрооборудования проводился с учетом не только его технических характеристик, но и экономической эффективности, адаптированности к конкретным условиям эксплуатации и потребностям предприятия.

«Распределительное устройство РУ 10 кВ выполняется комплектным (КРУ) со шкафами типа К–104М. Тип выключателя для данных ячеек ВВЭ–10У, тип трансформаторов тока ТЛК» [22]. Для подключения устройств релейной защиты и автоматики, а также КИП предусмотрена установка трансформаторов напряжения НАЛИ–СЭЦ–10УЗ. Выбранные ранее кабели

проверены «на термическую стойкость к токам КЗ. Для подключения устройств собственных нужд ГПП выбраны трансформаторы собственных нужд ТМ–16/10, которые подключаются к обмотке НН силовых трансформаторов ГПП через предохранители типа ПКТ–101–10–16–12,5. Для установки на вводе в ТП применяются выключатели нагрузки ВНРп–10/400 УЗ» [22].

Проверка основного электрооборудования на соответствие техническим требованиям и безопасность проводилась с целью обеспечения его надежной работы и защиты от возможных аварийных ситуаций. Это включало в себя испытания на нагрузку, термическую стойкость, электродинамическую стойкость и другие виды проверок, необходимые для обеспечения безопасной и эффективной работы электроэнергетической системы.

В результате проведенного анализа и проверки были сделаны обоснованные выводы и рекомендации по выбору электрооборудования на предприятии.

7 Выбор устройств релейной защиты и автоматики

«Выбор устройств релейной защиты и автоматики представляет собой ключевой этап в проектировании электроэнергетической системы, направленный на обеспечение ее надежности и безопасности» [23]. Устройства релейной защиты и автоматики играют важную роль в обнаружении и быстром устранении возможных аварийных ситуаций в электрических сетях, что позволяет минимизировать риск повреждения оборудования и обеспечить бесперебойную работу системы. В данном разделе будет рассмотрен процесс выбора и подбора устройств релейной защиты и автоматики для обеспечения эффективной работы электроэнергетической системы предприятия. Это включает в себя анализ функциональных требований, определение типов защиты и автоматики, выбор соответствующих моделей устройств, а также разработку схемы их взаимодействия в составе общей системы защиты.

Цель данного раздела заключается в обеспечении выбора оптимальных устройств релейной защиты и автоматики, которые будут соответствовать требованиям надежности, эффективности и безопасности электроэнергетической системы предприятия. Полученные результаты послужат основой для разработки проекта реализации системы релейной защиты и автоматики, что позволит обеспечить стабильную и безопасную работу электрооборудования на предприятии.

«Максимальная токовая защита кабельной линии, питающей трансформатор ТП–11 устанавливается со стороны источника питания. Данная защита выполнена с применением устройства релейной защиты микропроцессорного РЗЛ-03, производства ООО «ТД «Опытный завод энергооборудования». Реле включаются во вторичные цепи ранее выбранных трансформаторов тока. Ток срабатывания защиты отстраивается от максимального тока, протекающего через выключатель» [23]:

$$I_{C3} = \frac{k_{отс}}{k_B} \cdot I_{p.max}, \quad (101)$$

где $k_{отс} = 1,2$ – «коэффициент отстройки»;

$k_B = 0,9$ – коэффициентом возврата, для реле РЗЛ-03» [23],

$$I_{c3} = \frac{1,2}{0,9} \cdot 283 = 377,3 \text{ А.}$$

«Также ток срабатывания защиты необходимо проверить на согласование с током срабатывания защиты силового трансформатора» [23]:

$$I_{C3} = k_{отс} \cdot I_{F1.H}, \quad (102)$$

где $k_{отс} = 1,3$ – коэффициент отстройки;

$$I_{C3} = 1,3 \cdot 160 = 208 \text{ А.}$$

«К дальнейшему расчету принимается максимальное из данных значений, т.е. $I_{c3} = 377,3 \text{ А}$.

Реле включаются во вторичные цепи трансформатора тока ТЛК–10–400–У3–0,5/10Р. Коэффициент трансформации трансформатора тока $k_I = 80$, коэффициент схемы $k_{сх} = 1$.

Коэффициент чувствительности определяется по току двухфазного КЗ (103) по формуле (104)» [23],

$$I_{K3}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K3}^{(3)}, \quad (103)$$

$$k_{ч} = \frac{I_{K3}^{(2)}}{I_{c3}} \quad (104)$$

$$I_{K3}^{(3)} = 9,2 \text{ кА}$$

$$I_{кз}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 9,2 = 7,96 \text{ кА};$$

$$k_{ч} = \frac{7,96 \cdot 10^3}{377,3} = 21 > 1,5.$$

«Защита удовлетворяет требованиям чувствительности.

Определим ток срабатывания реле» [23]:

$$I_{ср.р} = \frac{1}{k_I} \cdot I_{сз}, \quad (105)$$

$$I_{ср.р} = \frac{1}{80} \cdot 377,3 = 4,72 \text{ А}.$$

Выдержка времени определяется по формуле:

$$t_{сз} = t_{сз3} + \Delta t, \quad (106)$$

где $\Delta t = 0,3 \text{ с}$ – ступень селективности для микропроцессорного реле,

$$t_{сз} = 0,35 + 0,3 = 0,65 \text{ с}.$$

Токи приводятся к низкой стороне:

$$I_{р.маx НН} = 283 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{10 \cdot 10^3}{0,4 \cdot 10^3} = 7,1 \text{ кА};$$

$$I_{сзНН} = 377,3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{10 \cdot 10^3}{0,4 \cdot 10^3} = 9,4 \text{ кА}.$$

Токовая отсечка без выдержки времени.

Защита выполняется с помощью устройства релейной защиты микропроцессорного РЗЛ-03. Применяются «трансформаторы тока типа ТЛК–

10–400–У3–0,5/10Р. Коэффициент трансформации трансформатора тока $k_I = 80$, коэффициент схемы $k_{СХ} = 1$.

Ток срабатывания защиты» [23]:

$$I_{сз} = k_{отс} \cdot I_{кз}, \quad (107)$$

где $k_{отс} = 1,2$ – коэффициент отстройки.

$$I_{сз} = 1,2 \cdot 8,8 = 10,56 \text{ кА} = 10560 \text{ А.}$$

Коэффициент чувствительности

$$k_{ч} = \frac{I_{кз}^{(2)}}{I_{сз}}, \quad (108)$$

$$k_{ч} = \frac{7,96}{10,56} = 0,75 < 2,0.$$

Видно, что токовая отсечка не соответствует необходимым требованиям по чувствительности, и, следовательно, необходимо рассмотреть использование «более сложных устройств релейной защиты, таких как дифференциальная защита. Однако, в данной ситуации принятие такого решения может оказаться неоправданным с технической и экономической точек зрения. В результате этого решения мы отказываемся от установки токовой отсечки и вместо нее применяем защиту от перегрузок (МТЗ) для защиты кабельной линии.

Защита от ОЗЗ.

Для обеспечения защиты от отключения заземления (ОЗЗ), на кабельных линиях устанавливаются трансформаторы тока нулевой последовательности типа ТЗЛМ, размещенные в ячейках комплектного распределительного устройства (КРУ). Реле тока типа РТЗ–51 подключается ко вторичной обмотке этих трансформаторов для контроля изоляции. Первичная обмотка

трансформаторов тока формируется из жил кабеля, на который они устанавливаются. При появлении замыкания на землю это равенство нарушается, что приводит к появлению тока во вторичной обмотке. Данный ток замыкается через катушку реле тока типа РТЗ–51.

Выводы по разделу 7

В седьмом разделе была рассчитана релейная защита участка сети от секционного выключателя 0,4 кВ ТП–11 до выключателя на ГПП завода и построена диаграмма селективности. В процессе анализа и выбора устройств были рассмотрены различные аспекты, такие как требования к чувствительности и быстродействию защиты, типы устройств и их функциональные возможности» [23].

Таким образом, результаты данного раздела позволили выбрать оптимальные устройства релейной защиты и автоматики, которые обеспечивают соответствие требованиям надежности, эффективности и экономической целесообразности. Полученные выводы послужат основой для разработки проекта реализации системы релейной защиты и автоматики, что позволит обеспечить стабильную и безопасную работу электрооборудования на предприятии.

8 Расчет заземления и молниезащиты

8.1 Расчет заземления ГПП

Раздел, посвященный расчету заземления главной понизительной подстанции (ГПП), является важным этапом проектирования электроэнергетической системы предприятия. Заземление играет ключевую роль в обеспечении безопасности работы электрических систем, предотвращении повреждений оборудования и защите персонала от электрических ударов.

В данном разделе будет рассмотрен процесс расчета заземления ГПП, который включает в себя определение необходимой глубины заложения заземляющих устройств, выбор оптимальной конфигурации заземлителей, оценку электрических параметров почвы, а также учет технических стандартов и нормативов.

Цель данного раздела заключается в обеспечении правильного и эффективного заземления ГПП, которое будет соответствовать требованиям безопасности, надежности и эффективности работы электроэнергетической системы предприятия. Полученные результаты послужат основой для разработки проекта реализации системы заземления, что позволит обеспечить стабильную и безопасную работу электрооборудования на «предприятии».

Исходными данными для расчета заземления подстанции являются:

- площадь ОРУ с учетом ограждения – $30 \times 50 \text{ м}^2$;
- сопротивление верхнего слоя грунта $\rho_1 = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (с учетом промерзания)» [24].
- сопротивление нижнего слоя грунта $\rho_2 = 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
- глубина верхнего слоя грунта $h_1 = 1,5 \text{ м}$;
- глубина заложения горизонтального заземлителя $t = 0,7 \text{ м}$;
- длина вертикального заземлителя $l_B = 5 \text{ м}$ » [24].

«Принимаем расстояние между вертикальными заземлителями $a = 10$ м.
Полосы прокладываем вдоль ячеек с шагом 10 м и поперек с шагом 10 м» [22];

Время срабатывания релейной защиты $t_{рз} = 0,12$ с;

Время отключения выключателя $t_{ов} = 0,08$ с.

«Ток стекающий с заземлителей ГПП при однофазном КЗ на рассматриваемого ОРУ $I_3^{(1)} = 1,5$ кА» [22].

«Длина горизонтальных полос заземляющего устройства» [22]:

$$L_{г} = 4 \cdot 50 + 6 \cdot 30 = 380 \text{ м.}$$

«Заземляющее устройство ОРУ–110 кВ показано на рисунке 10» [22].

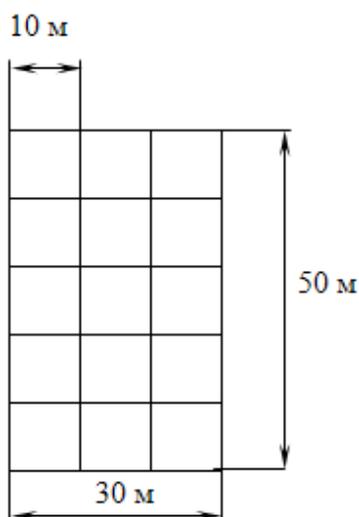


Рисунок 10 – Заземляющее устройство ОРУ–110 кВ

«Определяем предельно допустимое напряжение прикосновения» [22].

$$\tau_{в} = t_{рз} + t_{ов} ; \quad (109)$$

$$\tau_{в} = 0,12 + 0,08 = 0,2 \text{ с;}$$

отсюда $U_{пр доп} = 400$ В [25].

«Определяется коэффициент прикосновения» [25]

$$k_{\pi} = \frac{M \cdot \beta}{\left(\frac{I_B \cdot L_{\Gamma}}{a \cdot \sqrt{S}} \right)^{0,45}}; \quad (110)$$

где $M = 0,62$ при $\rho_1/\rho_2 = 100/50 = 2$ [25];

$$\beta = \frac{R_{\dot{\chi}}}{R_{\dot{\chi}} + 1,5 \cdot \rho_2}; \quad (111)$$

где $R_{\dot{\chi}}$ – сопротивление тела человека, принимаем $R_{\dot{\chi}} = 1000$ Ом;

$$\beta = \frac{1000}{1000 + 1,5 \cdot 50} = 0,93;$$

$$k_{\pi} = \frac{0,62 \cdot 0,93}{\left(\frac{5 \cdot 380}{10 \cdot \sqrt{50 \cdot 30}} \right)^{0,45}} = 0,168.$$

«Определяется потенциал на заземлителе» [25]:

$$U_3 = \frac{U_{\text{пр.доп}}}{k_{\pi}}; \quad (112)$$

$$U_3 = \frac{400}{0,168} = 2380 \text{ В.}$$

«Определяется сопротивление заземляющего устройства» [25]:

$$R_{\text{з.доп}} = \frac{U_3}{I_3}; \quad (113)$$

$$R_{\text{з.доп}} = \frac{2380}{1500} = 1,59 \text{ Ом.}$$

«Действительный план ЗУ преобразуем в расчетную квадратную модель» [22]:

$$\sqrt{S} = \sqrt{50 \cdot 30} = 12,25 \text{ м.}$$

«Число ячеек на стороне квадрата» [25]:

$$m = \frac{L_{\Gamma}}{2 \cdot \sqrt{S}}; \quad (114)$$

$$m = \frac{380}{2 \cdot 12,25} = 15,5;$$

принимается $m = 16$.

«Длина полос расчетной модели» [25]:

$$L'_{\Gamma} = 2 \cdot \sqrt{S} \cdot (m + 1); \quad (115)$$

$$L'_{\Gamma} = 2 \cdot 12,25 \cdot (16 + 1) = 415,5 \text{ м.};$$

Длина сторон ячейки

$$b = \frac{\sqrt{S}}{m}; \quad (116)$$

$$b = \frac{12,25}{16} = 0,77 \text{ м.}$$

«Число вертикальных заземлителей по периметру контура» [25]:

$$n_B = \frac{\sqrt{S} \cdot 4}{2 \cdot l_B}; \quad (117)$$

$$n_B = \frac{12,25 \cdot 4}{2 \cdot 5} = 4,9,$$

принимается $n_B = 5$ шт.

«Общая длина вертикальных заземлителей» [22]:

$$L_B = l_B \cdot n_B; \quad (118)$$

$$L_B = 5 \cdot 5 = 25 \text{ м.}$$

«Относительная глубина» [25]:

$$\frac{l_B + t}{\sqrt{S}} = \frac{5 + 0,7}{12,25} = 0,465 < 0,5;$$

тогда

$$A = 0,385 - 0,25 \cdot 0,465 = 0,268.$$

«Определяется ρ_3/ρ_2 причем используем: $\rho_1/\rho_2 = 2$, $a/l_B = 2$ » [22]:

$$\frac{h_1 - t}{l_B} = \frac{1,5 - 0,7}{5} = 0,16.$$

получается $\rho_3/\rho_2 = 1,12$ [25], тогда

$$r_3 = 1,12 \cdot 50 = 56 \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

«Определяется общее сопротивление сложного заземлителя» [22]:

$$R_3 = A \cdot \frac{\rho_3}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_3}{L_\Gamma + L_B}; \quad (119)$$

$$R_3 = 0,268 \cdot \frac{56}{12,25} + \frac{56}{415,5 + 25} = 1,35 \text{ Ом,}$$

что меньше допустимого $R_{3, \text{доп}} = 1,59 \text{ Ом}$.

Вычисляется напряжение прикосновения

$$U_{\text{пр}} = k_n \cdot I_3^{(1)} \cdot R_3; \quad (120)$$
$$U_{\text{пр}} = 0,168 \cdot 1500 \cdot 1,35 = 340,2 \text{ В},$$

что ниже предельно–допустимого значения 400 В.

8.2 Молниезащита ГПП

Раздел, посвященный расчету молниезащиты ГПП, играет важную роль в обеспечении безопасности и надежности работы электроэнергетической системы предприятия. Защита от молнии является одним из ключевых аспектов проектирования, поскольку молния может привести к серьезным повреждениям оборудования и прерыванию электроснабжения.

В данном разделе будет осуществлен расчет молниезащиты для ГПП, включая определение необходимых мер защиты, выбор типов защитных устройств, учет особенностей географического расположения предприятия и характеристик молниевой активности в регионе.

Цель данного раздела состоит в том, чтобы разработать эффективную систему молниезащиты, которая будет обеспечивать защиту от молнии как оборудования ГПП, так и самих зданий и сооружений, минимизируя риск повреждений и простоев в работе электроэнергетической системы. Полученные результаты послужат основой для разработки проекта реализации системы молниезащиты, что позволит обеспечить стабильную и безопасную работу электрооборудования на предприятии в условиях молниевой активности.

Расчет молниезащиты ГПП завода по производству БПЛА «выполняется на основании РД 34.21.121 Руководящие указания по расчету зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов.

К установке принимаются молниеотводы СМ–25, высота которых составляет 25 м.

Диагональ прямоугольника, в углах которого находятся молниеотводы определяется из плана ГПП завода по производству БПЛА и составляет $D_1 = 59,0$ м, расстояние между электродами 1 и 3 составляет $L1 = 40$ м, расстояние между электродами 1 и 2 составляет $L2 = 30$ м.

Активная высота молниеотводов определяется по формуле» [22]:

$$h_a = h - h_x, \quad (121)$$

где h – «высота молниеотвода, $h = 20$ м;

h_x – максимальная высота защищаемого объекта, $h_x = 8$ м» [22];

$$h_a = 20 - 8 = 12 \text{ м.}$$

«Радиус зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода ГПП завода по производству БПЛА» [22]:

$$r_x = h_a \cdot \frac{1,6}{1 + \frac{h_x}{h}} \cdot p, \quad (122)$$

где h – «высота молниеотвода, $h = 20$ м;

h_a – активная часть молниеотвода, куда приходит 100%-е попадание лидера молнии,

p – вероятность попадания молнии в защищаемую зону при $h \leq 30$ м,

$p = 1$ » [22],

$$r_x = 12 \cdot \frac{1,6}{1 + \frac{8}{20}} \cdot 1 = 12,0 \text{ м.}$$

Ширина защитной зоны:

– для стороны между молниеотводами 1–2 и 3–4 $L_1 = 31$ м, тогда

$$a_1 / h_a = 30 / 12 = 2,58, h_a / h = 12 / 20 = 0,6,$$

тогда из [22]

$$b_x / 2 \cdot h_a = 0,8,$$

откуда определяется ширина защитной зоны

$$b_x / 2 = 0,8 \cdot h_a, \quad (123)$$

$$b_x / 2 = 0,8 \cdot 12 = 9,6 \text{ м},$$

– для стороны между молниеотводами 1–3 и 2–4 $a = 40$ м, тогда

$$a_2 / h_a = 40 / 12 = 3,33, h_a / h = 12 / 20 = 0,6,$$

тогда из [22]

$$b_x / 2 \cdot h_a = 0,72,$$

откуда определяется ширина защитной зоны

$$b_x / 2 = 0,72 \cdot h_a, \quad (124)$$

$$b_x / 2 = 0,72 \cdot 12 = 8,64 \text{ м}.$$

– для диагонали между молниеотводами 1–4 и 2–3 $D_1 = 59,0$ м, тогда

$$D_1 / h_a = 59,0 / 12 = 4,92, h_a / h = 12 / 20 = 0,6,$$

тогда из [22]

$$b_x / 2 \cdot h_a = 0,4,$$

откуда определяется ширина защитной зоны

$$b_x / 2 = 0,4 h_a, \quad (125)$$

$$b_x / 2 = 0,4 \cdot 12 = 4,8 \text{ м.}$$

«Объект высотой h_x , находящийся внутри прямоугольника, образуемого молниеотводами, будет защищен в том случае, если диагональ прямоугольника, в углах которого находятся молниеотводы на высоте h_x не будет больше следующего значения» [22]:

$$D_1 < 8 \cdot (h - h_x) \cdot p, \quad (126)$$

$$D_1 = 59,0 \text{ м} \leq 8 \cdot (20 - 12) \cdot 1 = 64 \text{ м.}$$

«Наименьшая высота зоны защиты h_0 для молниеотводов до 30 метров составляет» [22]:

$$h_0 = h - \frac{D_1}{7}, \quad (127)$$

$$h_0 = 20 - \frac{59,0}{7} = 11,6 \text{ м,}$$

«что больше максимальной высоты защищаемого объекта – высоты портала ГПП завода по производству БПЛА. Таким образом, разработанная

молниезащита будет защищать ГПП завода по производству БПЛА от поражения электрическим током» [22].

Выводы по разделу 8.

В восьмом разделе ВКР рассчитано заземление и молниезащита ГПП завода. Данный раздел играет важную роль в обеспечении безопасности и надежности работы электроэнергетической системы предприятия. В процессе анализа и расчета были рассмотрены различные аспекты, такие как определение необходимых параметров заземления, выбор подходящих заземлителей, а также оценка эффективности системы молниезащиты.

Рассчитано заземление ГПП. Результаты расчета позволили определить оптимальные параметры и конфигурацию системы заземления, которая обеспечивает эффективную защиту от электрических разрядов и обеспечивает надежное заземление оборудования ГПП. Сетка выполнена из стальной полосы 40х4 мм. Полосы прокладываем вдоль ячеек с шагом 10 м и поперек с шагом 10 м. В качестве вертикальных заземлителей принята сталь угловая 50х50х5 длиной 5 м. Молниезащита ГПП выполняется четырьмя одиночными молниеотводами СМ-25.

Заключение

В выпускной квалификационной работе запроектирована электрическая сеть завода по производству БПЛА, рассчитано и выбрано электрическое оборудование. При проектировании системы были учтены все необходимые требования и нормы, включая обеспечение надежности и безопасности электроснабжения, а также минимизацию потерь электроэнергии.

Проведен анализ исходных данных по электроснабжению потребителей завода. Приведены характеристики цехов проектируемого предприятия, план предприятия. Проведен расчет электрических нагрузок.

Выбраны трансформаторы цеховых ТП. Приведен план предприятия с расположением выбранных ТП и питающей ВЛ. Рассчитана система внешнего электроснабжения предприятия. На ГПП предприятия принимаются к установке трансформаторы ТДН–16000/110/10. Рассчитаны токи КЗ. Для установки на ОРУ предприятия устанавливаются выключатели ВЭБ–110–40/1250, разъединители РГ–110/1000УХЛ1, ограничители перенапряжения: ОПН–110/56, ОПН–110/88.

Выбраны электрические аппараты и проводники завода.

Осуществлен выбор основного электрооборудования и его проверка. В ходе исследования были учтены технические требования и особенности производственного процесса завода, а также стандарты безопасности и нормативные требования. Выбор электрооборудования проводился с учетом не только его технических характеристик, но и экономической эффективности, адаптированности к конкретным условиям эксплуатации и потребностям предприятия. Распределительное устройство РУ 10 кВ выполняется комплектным (КРУ) со шкафами типа К–104М. Тип выключателя для данных ячеек ВВЭ–10У, тип трансформаторов тока ТЛК. Для подключения устройств релейной защиты и автоматики, а также КИП предусмотрена установка трансформаторов напряжения НАЛИ–СЭЩ–10УЗ. Выбранные ранее кабели проверены на термическую стойкость к токам КЗ.

Для подключения устройств собственных нужд ГПП выбраны трансформаторы собственных нужд ТМ–16/10, которые подключаются к обмотке НН силовых трансформаторов ГПП через предохранители типа ПКТ–101–10–16–12,5. Для установки на вводе в ТП применяются выключатели нагрузки ВНРп–10/400 УЗ.

Рассчитана релейная защита участка сети от секционного выключателя 0,4 кВ ТП–11 до выключателя на ГПП завода и построена диаграмма селективности. В процессе анализа и выбора устройств были рассмотрены различные аспекты, такие как требования к чувствительности и быстродействию защиты, типы устройств и их функциональные возможности.

Рассчитано заземление и молниезащита ГПП завода. Рассчитано заземление ГПП. Результаты расчета позволили определить оптимальные параметры и конфигурацию системы заземления, которая обеспечивает эффективную защиту от электрических разрядов и обеспечивает надежное заземление оборудования ГПП. Сетка выполнена из стальной полосы 40х4 мм. Полосы прокладываем вдоль ячеек с шагом 10 м и поперек с шагом 10 м. В качестве вертикальных заземлителей принята сталь угловая 50х50х5 длиной 5 м. Молниезащита ГПП выполняется четырьмя одиночными молниеотводами СМ-25.

Разработанная система электроснабжения обеспечивает надежное и качественное питание всех потребителей завода, а также позволяет снизить потери электроэнергии и улучшить энергоэффективность производства.

Список используемых источников

1. Анчарова Т.В., Стебунова Е.Д., Рашевская М.А. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений. Вологда : Инфра-Инженерия, 2016. 416 с.
2. Выключатель элегазовый баковый типа ВЭБ–110. http://www.uetm.ru/files/katalog_VEB-11.pdf (дата обращения 05.02.2024).
3. Вакуумные выключатели типа ВВЭ. <http://www.konstalin.ru/?star-tid=3&id=161> (дата обращения 05.02.2024).
4. Измерительные трансформаторы тока. http://www.czt.ru/transformator_toka.html (дата обращения 05.02.2024).
5. Киреева Э.А., Цырук С.А. Справочник электрика. М. : Колос, 2007. 464 с.
6. Комплектные распределительные устройства внутренней установки 6–10 кВ. http://www.moselectro-yug.ru/prod/pdf/2_kru2006.pdf (дата обращения 05.02.2024).
7. Кудрин Б.И. Электроснабжение: учебник. М.: Издательский центр «Академия», 2012. 352 с.
8. Ополева Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов : учебное пособие. М. : Форум, 2018. 350 с.
9. Ограничители перенапряжения нелинейные. http://www.uik.ru/net-cat_files/696/638/h_4d82627dfea00289f4895db29b4c87fe (дата обращения 05.02.2024).
10. Правила устройства электроустановок. – 7–е изд., перераб. и доп. // Консультант плюс: справочно–правовая система
11. РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования // Консультант плюс: справочно–правовая система
12. Рожков Л.Д., Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций: Учебник для ВУЗов. М.: Энергоатомиздат, 2007. 442 с.

13. РТМ 36.18.32.4–92. Указания по расчету электрических нагрузок // Консультант плюс: справочно–правовая система
14. Степанов В. М., Косырихин В. С. Системы электроснабжения промышленных предприятий : учебно-методическое пособие. Тула : Изд-во ТулГУ, 2013. 368 с.
15. Степанов В.М., Косырихин В.С. Расчёт и проектирование электрических сетей и систем. ТулГУ. Тула : Изд-во ТулГУ, 2014. 351 с.
16. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей // Консультант плюс: справочно–правовая система
17. Разъединители серии РГ на напряжение 35 – 500 кВ.– http://www.ues.su/product_img/razyed/rg35/ues_zeto_catalog_rg35.pdf (дата обращения 05.02.2024).
18. Счетчики электрической энергии многофункциональные СЭТ–4ТМ.03М.– http://www.nzif.ru/uploads/sel/psch4tm03m/ruk_03_02_m.pdf (дата обращения 05.02.2024).
19. Трансформаторы напряжения типа ЗНОГ–110.– http://www.vit.zp.ua/docu–ments/oelo/ru/znog–110_ru.pdf (дата обращения 05.02.2024).
20. Трансформаторно–реакторное оборудование. http://www.uetm.ru/files/tr–e_1.pdf (дата обращения 05.02.2024).
21. Трансформаторы напряжения трехфазной антирезонансной группы НАЛИ–СЭЩ–10–1У2. http://www.electroshield.ru/izmeritelnye_transformatory_nali (дата обращения 05.02.2024).
22. Фролов Ю. М. Электроснабжение промышленных предприятий : учебное пособие для вузов. М. : Издательство Юрайт, 2023. 351 с.
23. Щербаков Е.Ф., Александров Д.С., Дубов А.Л. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях : учебное пособие. М. : Форум, 2016. 208 с.

24. Bayliss C., Hardy D. Transmission and Distribution Electrical Engineering 4th Edition. Boston : Newnes, 2011. 1180 p.
25. Biegelmeier G. Electro supply system. Bulletin. Int. Sek IVSS Verhüt Arbeitsall und Berufskrankh Elek, 2017. 428 p.
26. Brian R. Gosselin. Electrical Systems for Industrial Facilities. Hoboken : Wiley, 2019. 384 p.
27. Hewitson L., Brown M., Balakrishnan R. Practical Power System Protection. Boston : Newnes, 2004. 288 p.
28. P.S.R. Murty. Electrical Power Systems. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2017. 840 p.