

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

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра Электроснабжение и электротехника

(наименование)

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки / специальности)

Электроснабжение

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Проектирование системы электроснабжения завода по производству
автомобильных дисков

Обучающийся

А.Ё. Миргарибов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

д.т.н., П.А. Николаев

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

Консультант

к.филол.н., доцент, С.Ю. Мамушкина

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

Тольятти 2025

Аннотация

В рамках настоящего бакалаврского исследования была выполнена разработка и последующее проектирование энергоэффективной системы электропитания. Данная система предназначена для обеспечения электроэнергией промышленного предприятия, функционирующего в металлообрабатывающей отрасли. Указанное предприятие осуществляет производственную деятельность, связанную с выпуском колесных дисков, используемых в автомобильном транспорте. В качестве основной задачи данного исследования рассматривается создание современной энергоснабжающей системы, отвечающей современным требованиям.

Целью данной бакалаврской работы является разработка проекта системы электроснабжения завода, специализирующегося на производстве автомобильных дисков, что требует учета множества технических и экономических факторов. Для достижения этой цели был проведен всесторонний технико-экономический анализ, на основании которого определена наиболее рациональная и оптимальная схема электроснабжения завода, учитывающая его специфические потребности и особенности работы.

Данная работа представляет собой актуальное исследование, которое имеет практическую значимость не только для завода по выпуску автомобильных дисков, но также для других предприятий аналогичного назначения, нуждающихся в модернизации или разработке новых систем электроснабжения.

Данная бакалаврская работа содержит пояснительную записку объемом 63 страницы, дополняемую 8 таблицами, 4 рисунками, а также 6 чертежами формата А1.

Abstract

The title of the graduation work is Design of power supply system for a plant for the production of automobile wheels. The graduation work consists of an introduction, 3 parts, 4 figures, 8 tables, a conclusion, and a list of 31 references including foreign sources. The aim of this graduation work is to develop a project for an electrical power supply system for a plant specializing in the production of automobile wheels, which requires taking into account many technical and economic factors. The object of the graduation work is a plant for the production of automobile disks. The subject of the graduation work is the power supply system of a plant for the production of automobile disks. The key issue of the graduation work is to conduct a comprehensive technical and economic analysis, on the basis of which the most rational and optimal power supply scheme for the plant is determined, taking into account its specific needs and operating characteristics. The graduation work may be divided into several logically connected parts which are literature review, results and their discussion, calculation part, selection of electrical equipment. The first part describes in details the structure of the power supply system of the plant for the production of automobile disks, and defines the reliability categories of the equipment used at the enterprise. The second part outlines the results of designing the power supply system of the plant: calculation of electrical loads was performed, a load map was constructed, the number and capacity of transformer substations and the electrical equipment used in them were determined. The third part consists of consideration of two issues: the main measures for electrical safety of the plant and calculation of protective grounding of electrical installations of the transformer substation. In conclusion we'd like to emphasize that the creation of economical, reliable industrial power supply system's allows for the technically and economically competent organization of the technological process at the enterprise. The work is of interest for wide circle of readers interested in factory power supply systems.

Содержание

Введение.....	5
1 Описание структуры системы электроснабжения завода по выпуску автомобильных дисков	8
1.1 Область деятельности предприятия	8
1.2 Краткое описание технологического процесса.....	10
1.3 Категории надежности потребителей и производственная среда.....	12
2 Проектирование системы электроснабжения завода	15
2.1 Расчет электрических нагрузок	15
2.2 Построение картограммы заводских цехов.....	20
2.3 Расчет числа и мощности цеховых трансформаторных подстанций с учетом компенсации реактивной мощности	23
2.4 Проектирование схемы внутреннего электроснабжения.....	29
2.5 Выбор вариантов схем электроснабжения	31
2.6 Выбор кабельных линий для вариантов схем электроснабжения	32
2.7 Схема электроснабжения выходного дня завода.....	36
2.8 Расчет и выбор выключателей	42
2.9 Выбор выключателей нагрузки и предохранителей.....	44
2.10 Выбор и проверка шинной конструкции	45
2.11 Релейная защита кабельной линии между ГРУ и цеховой ТП	46
3 Безопасность проекта.....	52
3.1 Основные меры по электробезопасности завода	52
3.2 Расчет защитного заземления электроустановок трансформаторной подстанции	54
Заключение	58
Список используемой литературы и используемых источников.....	59

Введение

В сфере электроснабжения потребителей электроэнергией наиболее значимыми задачами, которые определяют направление промышленного развития, являются несколько важнейших аспектов, направленных на повышение общей эффективности систем.

В первую очередь, приоритетом является систематическое совершенствование проектно–конструкторских решений, которые обеспечивают базу для разработки новых и более эффективных технологий.

Во вторую очередь, значительное внимание уделяется не только внедрению, но и последующей рациональной эксплуатации высоконадежного оборудования, способного обеспечивать стабильность работы систем.

В–третьих, крайне важной задачей является минимизация всех видов потерь электроэнергии, которые возникают на этапах ее передачи, распределения и непосредственного потребления конечными пользователями.

Современные системы электроснабжения характеризуются постепенным усложнением своей структуры, что обусловлено необходимостью соответствовать растущим требованиям экономики и технологического развития. Наряду с этим, наблюдается значительное увеличение требований к экономической эффективности и надежности функционирования данных систем в условиях увеличивающейся нагрузки. Дополнительно, происходит постоянное изменение состава потребителей электроэнергии, а также их характеристик, что оказывает прямое влияние на структуру и режимы работы систем [29]. Внедрение современных систем управления, функционирующих на базе вычислительной техники, становится объективной необходимостью для обеспечения точного распределения и управления потреблением электроэнергии. Такая тенденция требует от специалистов наличия высоких инженерных навыков и глубокого понимания современных технологий

управления. Более того, для успешного решения текущих задач особую значимость приобретает освоение эффективных методов инженерного анализа, а также практическое применение накопленных теоретических знаний в реальных условиях. Современные промышленные предприятия, и в особенности машиностроительные компании, функционируют в условиях высокой динамики технологических процессов, что обусловлено стремительным развитием отрасли. Подобная динамичность в значительной степени обусловлена непрерывным процессом внедрения новых методов обработки материалов и совершенствования технологий производства.

Кроме того, происходит не только постоянная модернизация оборудования, но и активное совершенствование моделей выпускаемой продукции, что требует значительных усилий со стороны инженерных команд. В связи с этим, предприятия должны обладать достаточной степенью гибкости, чтобы своевременно адаптироваться к изменениям в условиях производства. Данная гибкость предоставляет возможность оперативно адаптироваться к изменениям в производственных программах, включая выпуск новой или модернизированной продукции. Кроме того, эта гибкость способствует успешной модернизации выпускаемой продукции и внедрению самых передовых технологий, что обеспечивает конкурентоспособность предприятия. Более того, такая стратегия минимизирует производственные потери, которые часто сопровождают процесс автоматизации оборудования, повышая общую эффективность работы предприятия.

Актуальность темы выпускной квалификационной работы заключается в том, что создание экономичных, надежных промышленных систем электроснабжения позволяют технически и экономически грамотно организовать технологический процесс на предприятии. Снижение затрат на эксплуатацию системы электроснабжения достигается за счет разработки рациональных компонентов распределительных устройств, цеховых

подстанций и проведения оптимизации системы подачи электроэнергии. На экономичность системы также влияет выбор рационального уровня напряжения, оптимальных сечений проводников, средств компенсации реактивной мощности.

Практическая значимость «состоит в разработке проекта электроснабжения, выборе трансформаторов, оборудования коммутации и защиты, силовых линий, а также в определении экономической эффективности» [29].

Объектом исследования является завод по производству автомобильных дисков.

Предметом исследования является система электроснабжения, в качестве комплекса устройств, предназначенных для передачи и распределения электрической энергии к заводским потребителям электрической энергии.

Целью выпускной квалификационной работы является проектирование надежной и эффективной с экономической точки зрения, системы электроснабжения завода по производству автомобильных дисков.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- «провести краткий анализ хозяйственной деятельности предприятия;
- провести расчет системы электроснабжения;
- произвести расчет токов короткого замыкания;
- выбрать оборудование и аппараты защиты;
- произвести расчет заземляющего устройства;
- рассмотреть вопросы техники безопасности при обслуживании электроустановок» [29].

Результатом данной работы будет являться «разработанный проект электроснабжения завода по производству автомобильных дисков, проверка его по различным условиям эксплуатации и критериям надежности в аварийных режимах работы» [29].

1 Описание структуры системы электроснабжения завода по выпуску автомобильных дисков

1.1 Область деятельности предприятия

Завод выпускает два вида дисков: штампованные стальные и литые. Годовая производительность завода около 2 миллионов дисков. Процесс производства дисков является сложным технологическим процессом, с применением технических инноваций, современного металлообразующего и обрабатывающего оборудования, как на рисунке 1, плюс обязательный многоступенчатый контроль качества. [13]



Рисунок 1 – Изготовление автомобильных дисков

В процессе изготовления штампованных колесных дисков применяют листовую сталь, которая поступает на производственные предприятия в форме бухт. Эти бухты сначала разматывают, а затем разрезают на заготовки,

индивидуально подбираемые для каждого конкретного типоразмера изделия в соответствии с его техническими параметрами. Из подготовленных заготовок путем последовательного выполнения операций вальцовки, прессования и сварки формируется полуфабрикат. На следующем этапе полуфабрикат подвергают дальнейшей обработке, в ходе которой ему придают необходимый профиль, соответствующий ободу будущего колесного диска.

На этапе сборки спицы запрессовываются в обод, а их соединение выполняется с применением метода точечной четырехтактной сварки, которая осуществляется в среде углекислого газа для повышения качества шва. После завершения процесса сборки готовый диск подвергается строгому контролю качества, что необходимо для проверки его соответствия установленным техническим и эксплуатационным требованиям. После успешного прохождения проверки на поверхность изделия наносится защитно–декоративное покрытие, которое обеспечивает не только эстетический вид, но и дополнительную защиту от внешних воздействий.

Процесс изготовления литых колесных дисков.

Производственный цикл, связанный с созданием литого диска, начинается с подготовки пресс–формы, которые предназначены для отливки заготовок. На заводах для этого используются исключительно высококачественные материалы. Основными компонентами применяемых сплавов являются жидкий алюминий, кремний, а также легирующие добавки, специально подобранные для обеспечения высоких эксплуатационных характеристик изделий. Эти сплавы подвергаются термической обработке, проводимой по технологии Т6. Такая обработка значительно улучшает устойчивость материала к термическим нагрузкам, а также способствует увеличению механической прочности примерно на 20%, что особенно важно для дисков.

После завершения подготовки сплава опытные образцы направляются на спектральный анализ. Этот анализ позволяет убедиться в том, что материал полностью соответствует строгим техническим нормам и требованиям. Заготовки изготавливаются с использованием метода литья под низким давлением, а также технологии кокильной заливки форм. Такой подход обеспечивает максимально быстрое и равномерное заполнение формы расплавом, в результате чего получается сплав с высокой плотностью микроструктуры.

Готовые литые заготовки проходят обязательный рентгеноскопический контроль. Этот этап необходим для выявления и исключения из дальнейшего производственного процесса изделий, содержащих какие-либо внутренние дефекты. После этого производится механическая обработка заготовок на высокоточных станках с числовым программным управлением (ЧПУ), которые позволяют изготавливать диски самых различных типоразмеров. Диапазон производимых типоразмеров охватывает изделия диаметром от 12 до 30 дюймов, что удовлетворяет потребности широкого круга заказчиков.

1.2 Краткое описание технологического процесса

«Крупные основные цеха завода: малярный цех, сборочно–установочный цех, корпусно–котельный цех (ККЦ), ремонтно–механический цех (РМЦ), кузнечный цех (КЦ), литейная, заводоуправление, механический цех (МЦ), модельный цех, металлообрабатывающий цех» [13].

В литейном цехе производится литье продукции и переплавки металла. Ремонтно–механический цех производит ремонт поломавшегося оборудования. Корпусно–котельный цех снабжает завод, перекачивая и распределяя, паром и горячей водой. В здании заводоуправления находятся административные службы завода, телефонная станция, столовая. Металлообрабатывающий цех

изготавливает корпусные детали. В механическом цехе предприятия осуществляется полный комплекс операций по обработке деталей, включая их доведение до требуемых размеров и форм в соответствии с установленными стандартами. Помимо основного процесса обработки, в данном цехе выполняются слесарные и отделочные работы, направленные на улучшение качества деталей и их подготовку к дальнейшему использованию.

В кузнечном цехе проводятся операции горячей штамповки, которые включают формирование изделий из металлических заготовок под воздействием высоких температур и значительного давления. Данный технологический процесс направлен на придание металлическим заготовкам заданных форм и размеров, что достигается благодаря использованию нагрева и мощного механического воздействия.

На заводе функционирует ряд вспомогательных подразделений, которые обеспечивают бесперебойное выполнение вспомогательных операций, необходимых для стабильной работы основных производственных цехов. В компрессорном отделении осуществляется производство сжатого воздуха, который необходим для выполнения различных технологических процессов на предприятии. Сжатый воздух распределяется по цехам завода посредством специально организованной системы трубопроводов, что позволяет оперативно обеспечивать все технологические нужды.

Во вспомогательных подразделениях размещено насосное оборудование, предназначенное для обеспечения как прямого и обратного водоснабжения, так и подачи питьевой воды на все участки предприятия. На территории завода организован специальный склад моделей, которые используются в процессе производства для подготовки изделий заданной конфигурации.

В таблице 1 приводится подробная информация о распределении электрических нагрузок, включая номинальные мощности ($P_{ном,j}$), рассчитанные для каждого из производственных цехов предприятия.

Таблица 1 – Электрические нагрузки

Наименование потребителей	$P_{ном, j}$, кВт
1. «Малярный и сборочно–установочные цехи	499,71
2. Компрессорная	887,13
3. Корпусно–котельный цех (ККЦ)	3107,91
4. Литейная	3709,09
5. Склад моделей	99,52
6. Ремонтно–механический цех (РМЦ)	1572,13
7. Кузнечный цех (КЦ)	1482,52
8. Насосная	885,44
9. Заводоуправление, столовая, СКБ	589,52
10. Механический цех (МЦ)	3963,66
11. Модельный цех	498,32
12. Склад	60,00
13. Металлообрабатывающий цех» [13]	498,48

1.3 Категории надежности потребителей и производственная среда

Согласно требованиям, изложенным в «Правилах устройства электроустановок» (ПУЭ), «все потребители электрической энергии классифицируются на три основные категории, которые зависят от степени надежности, необходимой для их электроснабжения.

Потребители, относящиеся к I категории, представляют собой объекты, для которых отказ в подаче электроэнергии способен повлечь за собой серьезные негативные последствия. К ним относятся ситуации, угрожающие жизни людей, причиняющие значительный ущерб экономике, вызывающие повреждения оборудования или приводящие к массовому выпуску дефектной продукции» [14]. Кроме того, сбой в электроснабжении потребителей этой категории может нарушить сложные технологические процессы, которые задействованы на особо важных объектах промышленности или инфраструктуры. Для таких потребителей требуется обязательное обеспечение

питания от как минимум двух независимых источников, которые должны быть полностью автономны друг от друга.

Независимый источник питания определяется как такой, который сохраняет рабочее напряжение, даже если оно отсутствует на других источниках, задействованных в системе. «Для объектов, относящихся к категории особо важной надежности в рамках I категории, предусматривается использование дополнительного третьего аварийного источника питания. Перерыв в подаче электроэнергии для таких объектов допускается только на минимально возможное время» [14], необходимое для автоматического включения резервного источника питания.

«Потребители, классифицируемые как II категория, включают в себя такие электроприемники, сбой в работе которых приводит к значительным экономическим потерям, таким как массовый недовыпуск продукции» [14], вынужденные простои оборудования, остановка промышленного транспорта и нарушение нормальной работы городской инфраструктуры. Для электроприемников этой категории допустимы кратковременные прерывания в электроснабжении, продолжительность которых ограничена временем, необходимым для подключения резервного питания вручную. Резервное питание для потребителей II категории подключается либо штатным дежурным персоналом, либо выездными ремонтными бригадами, оснащенными всем необходимым оборудованием.

Электроприемники, относящиеся к III категории, представляют собой все остальные объекты, которые не подпадают под определения, установленные для I и II категорий. Для таких потребителей допускается прекращение подачи электроэнергии на продолжительное время, но при условии, что это не приведет к серьезным последствиям для пользователей.

Наиболее высокая степень надежности электроснабжения достигается в системах, где используются замкнутые схемы работы электрических сетей.

Для обеспечения требуемой степени надежности электроснабжения предусмотрено использование резервных источников питания, которые активируются в случае аварии. «Кроме резервирования, важное значение имеют устройства релейной защиты и автоматического управления, которые включают системы автоматического повторного включения (АПВ)» [14].

Также к таким устройствам относятся автоматический ввод резерва (АВР) и системы автоматической частотной разгрузки (АЧР), которые позволяют эффективно управлять режимами работы сети. Большинство потребителей электрической энергии относится ко II или III категории по надежности, за исключением определенных объектов, обладающих особым статусом. К таким объектам относятся «цеха ККЦ, КЦ, компрессорная, литейная, а также системы аварийного освещения, которые требуют более высокого уровня надежности» [14]. «Электроснабжение для этих объектов осуществляется от разных секций шин и от различных трансформаторов, что обеспечивает требуемый уровень резервирования» [14].

Выводы по разделу 1.

В данном разделе исследования осуществлен детальный анализ ключевых аспектов деятельности предприятия. Проведенный анализ охватывает производственную сферу и технологические процессы исследуемого предприятия. Указанное предприятие осуществляет промышленный выпуск колесных дисков, являющихся важным компонентом автомобильной техники. Производимая продукция предназначена для использования в автомобильной промышленности, что определяет требования к ее качеству и эксплуатационным характеристикам. Здесь же приведены электрические нагрузки заводских потребителей электрической энергии и их распределение в зависимости от категорий надежности.

2 Проектирование системы электроснабжения завода

2.1 Расчет электрических нагрузок

В процессе выполнения укрупненных расчетов, которые проводятся на этапе проектирования здания, активно применяются специализированные методики, адаптированные для предварительных оценок. Указанные методики базируются на собранных данных о совокупной установленной мощности различных групп электроприемников, таких как отделения, цехи и корпуса. К числу таких групп, входящих в расчет, обычно относят структурные подразделения предприятия, включая отделения, производственные цехи и корпуса завода. Для проведения точного расчета общезаводских нагрузок настоятельно рекомендуется выполнять расчет силовой нагрузки с учетом всех действующих нормативов и параметров. Данный расчет выполняется, опираясь на величины установленной мощности группы потребителей электроэнергии, а также на коэффициент спроса, характерный для данных условий эксплуатации.

«Для корректного выполнения расчетов по предлагаемому методу необходимо иметь в распоряжении данные о нескольких ключевых параметрах, влияющих на результат» [19]. Среди них – установленная мощность группы электроприемников ($P_{\text{ном}}$), представляющая собой базовую характеристику для расчетов. Также необходимы коэффициент мощности ($\cos\phi$), который отражает фазовые соотношения, и коэффициент спроса (k_c), определяющий характер потребления энергии. Значения коэффициента спроса определяются по специальной таблице [19]. Характеристики режимов работы электроприемников отличаются значительным разнообразием, что обусловлено спецификой их использования в различных условиях. Эти режимы эксплуатации подвержены изменению во времени, что необходимо учитывать при планировании и расчетах энергопотребления. Для более точного описания

особенностей потребляемой мощности принято использовать ряд определений, включающих следующие ключевые термины. «Под номинальной активной мощностью электроприемника (P_p) понимают значение мощности, которое задается в технической документации и соответствует оптимальному режиму его функционирования. Данное значение указывает на уровень мощности, при котором электроприемник должен функционировать в своем стандартном, расчетном режиме эксплуатации. Указанные данные обычно отражаются на заводской табличке, прикрепленной к устройству, или фиксируются в его техническом паспорте» [19].

«Номинальная реактивная мощность электроприемника (Q_p) определяется как величина реактивной мощности, потребляемой или возвращаемой устройством в условиях номинальной активной мощности и напряжения. Данное значение указывает на объем реактивной мощности, которая либо потребляется устройством из электрической сети (обозначается знаком «+»), либо передается обратно в сеть (обозначается знаком «-»). Указанные значения рассчитываются на основании условий номинальной активной мощности и номинального напряжения, соответствующих штатному режиму работы устройства» [19].

«Коэффициент использования активной мощности группы электроприемников ($k_{иj}$) характеризует эффективность использования активной мощности в пределах группы устройств. Он представляет собой отношение средней активной мощности группы ($P_{ср.м,j}$) за наиболее загруженную смену к номинальной мощности ($P_{ном,j}$) для j-го цеха» [19]:

$$k_{и,j} = P_{ср.м,j} / P_{ном,j}. \quad (1)$$

«Коэффициент максимума $k_{м,j}$ » [19]:

$$k_{м,j} = P_{p,j} / P_{ср.м,j} \cdot \quad (2)$$

«Коэффициент спроса $k_{с,j}$ » [19]:

$$k_{с,j} = P_{p,j} / P_{ном,j} \cdot \quad (3)$$

«Коэффициент разновременности максимумов нагрузок $k_{р.м,j}$ » [19]:

$$k_{\delta,i,j} = P_{p,j} / \sum_{i=1}^n P_{\delta,i,j} \cdot \quad (4)$$

«Расчетные активная, реактивная и полная нагрузки $P_{p,j}$, $Q_{p,j}$, $S_{p,j}$ соответственно для j -го цеха» [27]:

$$P_{p,j} = k_{с,j} \cdot P_{ном,j}; \quad (5)$$

$$Q_{p,j} = P_{p,j} \cdot \operatorname{tg} \varphi_j; \quad (6)$$

$$S_{p,j} = \sqrt{P_{p,j}^2 + Q_{p,j}^2}, \quad (7)$$

где $\operatorname{tg} \varphi_j$ – «коэффициент, соответствующий $\cos \varphi_j$ данной группы электроприемников j -го цеха, $\cos \varphi_j$ » [20];

$k_{с,j}$ – «коэффициент спроса данной группы электроприемников j -го цеха» [20].

«Расчетные активная, реактивная нагрузки осветительных приборов $P_{р.о,j}$, $Q_{р.о,j}$, j -го цеха» [19]:

$$P_{р.о,j} = k \cdot k_{с.о,j} \cdot P_{удj} \cdot F_j, \quad (8)$$

$$Q_{р.о,j} = P_{р.о,j} \cdot \operatorname{tg} \varphi_o. \quad (9)$$

«Расчетные суммарные активная, реактивная и полная нагрузки с учетом освещения ($P_{p.сум,j}$, $Q_{p.сум,j}$, $S_{p.сум,j}$) j-го цеха» [19]:

$$P_{p.сум j} = P_{p,j} + P_{p.o,j}, \quad (10)$$

$$Q_{p.сум j} = Q_{p,j} + Q_{p.o,j}; \quad (11)$$

$$S_{p.сум j} = \sqrt{P_{p.сум j}^2 + Q_{p.сум j}^2}. \quad (12)$$

«Расчет электрических нагрузок по методу коэффициента спроса и установленной мощности рассмотрим на примере цеха ККЦ по формулам (5...9)» [19]:

$$P_{p.ККЦ} = 0,7 \cdot 3107,91 = 2175,54 \text{ кВт},$$

$$Q_{p.ККЦ} = 2175,54 \cdot 1,05 = 2284,31 \text{ квар},$$

$$S_{p.ККЦ} = \sqrt{2175,54^2 + 2284,31^2} = 3154,53 \text{ кВА},$$

$$P_{p.o.ККЦ} = 1,1 \cdot 0,95 \cdot 15 \cdot 10^{-3} \cdot 7000 = 109,7 \text{ кВт},$$

$$Q_{p.o.ККЦ} = 109,7 \cdot 0,48 = 53,1 \text{ кВА}.$$

«Аналогично определяем для других заводских подразделений, полученные результаты заносим в таблицу 2» [19].

Таблица 2 – Результаты расчета электрических нагрузок

№ цеха	$P_{ном,j}$, кВт	$\cos\varphi_j / \tg\varphi_j$	F_j , м ²	$k_{с,j}$	$P_{уд,j}$, Вт/м ²	$k_{с.o,j}$	$P_{p,j}$, кВт	$Q_{p,j}$, квар	$P_{p.o,j}$, кВт	$Q_{p.o,j}$, квар
1	499,71	0,78/0,80	5640	0,552	14	0,944	319,47	278,72	90,13	39,65
2	887,13	0,76/0,82	950	0,791	14	0,944	738,14	561,47	16,54	8,12
3	3107,91	0,69/1,05	7000	0,688	15	0,944	2175,54	2284,31	112,65	49,67
4	3709,09	0,78/0,80	3880	0,498	14	0,944	1981,48	1597,13	59,62	29,28
5	99,52	0,95/0,33	2950	0,704	13	0,588	70,45	19,35	34,54	16,42
6	1572,13	0,58/1,40	3920	0,448	13	0,944	739,41	1107,17	60,12	30,11
7	1482,52	0,80/0,75	3920	0,404	14	0,944	479,91	359,63	59,86	29,18

Продолжение таблицы 2

№ цеха	$P_{ном,j}$, кВт	$\cos\varphi_j / \tg\varphi_j$	F_j , м ²	$k_{с,j}$	$P_{уд,j}$, Вт/м ²	$k_{с.о,j}$	$P_{р,j}$, кВт	$Q_{р,j}$, квар	$P_{р.о,j}$, кВт	$Q_{р.о,j}$, квар
8	885,44	0,60/1,33	2180	0,577	14	0,944	539,47	699,11	30,13	14,52
9	589,52	0,95/0,33	4950	0,587	14	0,772	249,08	79,44	70,14	29,87
10	3963,66	0,87/0,57	5010	0,411	13	0,844	1491,18	861,72	60,12	26,85
11	498,32	0,73/0,94	4870	0,682	14	0,844	399,32	382,74	80,23	40,17
12	60,00	0,90/0,48	2950	0,704	14	0,581	40,12	20,13	30,12	15,88
13	498,48	0,70/1,02	6830	0,822	16	0,944	408,96	404,55	129,87	63,13

Расчетные суммарные P , Q и S нагрузки суммарно с освещением для подразделения ККЦ рассчитываются по формулам (10...12):

$$P_{р.сум.ККЦ} = 2175,54 + 112,65 = 2288,19 \text{ кВт},$$

$$Q_{р.сум.ККЦ} = 2284,31 + 49,67 = 2333,98 \text{ квар},$$

$$S_{р.сум.ККЦ} = \sqrt{2288,19^2 + 2333,98^2} = 3268,53 \text{ кВА}.$$

«Результаты расчета по остальным подразделениям в таблице 3» [19].

Таблица 3 – «Расчетные активные и реактивные мощности потребителей» [19]

Напряжение, В	Номер цеха	$P_{р.сум,j}$, кВт	$Q_{р.сум,j}$, квар	$S_{р.сум,j}$, кВА
380	1	409,6	318,37	518,77
380	2	754,68	569,59	945,51
380	3	2288,19	2333,98	3268,53
380	4	2041,11	1626,41	2609,85
380	5	104,99	35,77	110,91
380	6	799,53	1137,28	1390,19
380	7	539,77	388,81	665,22
380	8	569,6	713,63	913,08
380	9	319,22	109,31	337,41
380	10	1551,3	888,57	1787,76
380	11	479,55	422,91	639,39
380	12	70,24	36,01	78,93

Продолжение таблицы 3

Напряжение, В	Номер цеха	$P_{p.сум,j}$, кВт	$Q_{p.сум,j}$, квар	$S_{p.сум,j}$, кВА
380	13	538,83	467,68	713,48
Сумма	–	10466,61	9048,32	13835,53

2.2 Построение картограммы заводских цехов

Картограмма распределения электрических нагрузок разрабатывается с учетом генерального плана промышленного предприятия, охватывая все его ключевые элементы [10].

В данном подходе «в качестве электроприемников рассматриваются отдельные корпуса завода, которые выступают основными объектами анализа. Визуальная интерпретация картограммы нагрузок выполняется в форме круговой диаграммы, что обеспечивает наглядность представления данных [28].

Центр изображенного круга точно соответствует центру электрических нагрузок (ЦЭН), рассчитанному для всех электроприемников, находящихся на предприятии. Радиус круга определяется как величина, пропорциональная расчетной мощности каждого конкретного корпуса, что позволяет визуализировать различия между ними» [10]. Конкретное значение радиуса окружности вычисляется на основании заранее заданной формулы, которая «учитывает ключевые параметры электрической нагрузки» [10]:

$$r_j = \sqrt{\frac{P_{p.c. cy j}}{\pi m}}, \quad (13)$$

где r_j – «радиус окружности j -го цеха» [10];

m – «масштаб, принимаем равным 1кВА в 1 мм» [10];

$P_{p.cym,j}$ – «расчетная мощность j-го корпуса и определяется по специальной таблице» [10]

«Каждый круг состоит из секторов, размеры которых равны значениям осветительной и активной нагрузкам. Угол сектора осветительной нагрузки в выбранном масштабе» [10]:

$$\alpha_j = \frac{P_{p.o,j}}{\pi r^2 m}, \quad (14)$$

где α_j – «градусная мера соответствующего центрального угла» [10];

$P_{p.o,j}$ – «расчетная активная мощность осветительной нагрузки, определяемая по специальной таблице» [10].

Например, для подразделения ККЦ:

$$r_{ккц} = \sqrt{\frac{2288,19}{3,14 \cdot 1,0}} = 25,7 \text{ м};$$

$$\alpha_{ккц} = \frac{112,65 \cdot 360}{3,14 \cdot 25,7^2 \cdot 1} = 19,0^\circ.$$

Для остальных цехов результаты расчета в таблице 4.

«Поскольку нагрузки, возникающие в различных цехах, равномерно распределяются по площади каждого из этих цехов, центры нагрузок можно рассматривать как совпадающие с центрами масс геометрических фигур, представляющих эти цехи на генеральном плане завода. В целях упрощения процесса расчетов, для уменьшения сложности, мы не будем делать различия между различными видами активных нагрузок, объединяя таким образом силовую нагрузку и осветительную нагрузку в одну общую категорию» [10].

«Координаты условного ЦЭНа (x_o, y_o)» [10]:

$$x_o = \frac{\sum_{j=1}^n P_{p,j} \cdot x_j}{\sum_{j=1}^n P_{p,j}}, \quad (15)$$

$$y_o = \frac{\sum_{j=1}^n P_{p,j} \cdot y_j}{\sum_{j=1}^n P_{p,j}}, \quad (16)$$

где $P_{p,j}$ – «расчетная активная нагрузка j -го цеха, узла электрических нагрузок» [10];

x_j – «абсцисса j -го цеха, узла электрических нагрузок в выбранной системе координат на генеральном плане завода в графической части проекта» [10];

y_j – «ордината j -го цеха, узла электрических нагрузок в выбранной системе координат на генеральном плане завода в графической части проекта» [10]

Таблица 4 – «Построение картограммы электрических нагрузок» [10]:

Номер цеха	Исходные данные		Расчетные данные			
	$P_{p,сум,j}$, кВт	$P_{p.o,j}$, кВт	α_j	$r_{a,j}$, м	x_j , м	y_j , м
1	409,6	90,13	77,18	10,98	79	218
2	754,68	16,54	8,13	16,04	98	119
3	2288,19	112,65	19,0	26,61	219	258
4	2041,11	59,62	10,23	24,98	238	139
5	104,99	34,54	120,09	6,08	407	277
6	799,53	60,12	27,43	16,86	357	79
7	539,77	59,86	42,25	12,98	511	138
8	569,6	30,13	18,35	14,07	497	297
9	319,22	70,14	76,64	9,86	589	157
10	1551,3	60,12	12,04	21,27	637	319
11	479,55	80,23	59,37	11,96	674	79
12	70,24	30,12	158,71	5,05	772	339
13	538,83	129,87	92,87	13,14	795	119

2.3 Расчет числа и мощности цеховых трансформаторных подстанций с учетом компенсации реактивной мощности

«При проектировании расположения подстанций на плане корпусов предприятия их размещение производится таким образом, чтобы максимально эффективно приблизить их к зонам потребления электрической энергии» [10], обеспечивая при этом оптимальное распределение мощности и минимизацию потерь при передаче. Трансформаторные подстанции, которые питают цеховые производственные линии завода, могут быть размещены либо непосредственно внутри самих цехов, что способствует сокращению длины кабелей и минимизации потерь, либо в специально предназначенных для этого пристроях, которые примыкают к питаемым цехам, что также способствует повышению оперативности в обслуживании и эксплуатации. Точное и детализированное местоположение каждой трансформаторной подстанции указано в графической части генерального плана завода, что позволяет точно локализовать их размещение на территории. В качестве цеховых подстанций для обеспечения питания этих подразделений рекомендуется использовать комплектные трансформаторные подстанции (КТП), которые обеспечивают высокую надежность работы и «имеют трансформаторы мощностью 1000 кВА, 1600 кВА и 2500 кВА, что позволяет удовлетворить различные потребности в электроснабжении в зависимости от специфики работы производственных цехов» [30]. «Ориентировочный выбор числа и мощности трансформаторных подстанций для каждого из цехов будет произведен на основе расчетов, учитывающих удельную плотность нагрузки G_n , характерную для каждого конкретного производственного цеха, что позволяет точно подбирать необходимое оборудование для обеспечения стабильного и эффективного электроснабжения» [26]:

$$G_{н,j} = \frac{S_{p.сумj}}{F_j}, \quad (17)$$

где F_j – «площадь j -го цеха (корпуса), m^2 » [26].

В системах электроснабжения промышленных предприятий мощность силовых трансформаторов, как правило, должна быть достаточной для того, чтобы обеспечить бесперебойное питание всех потребителей электроэнергии при различных режимах эксплуатации, что является критически важным для нормального функционирования всех технологических процессов. Минимальное количество цеховых трансформаторов $N_{min,j}$, которые должны быть оснащены одинаковой номинальной мощностью $S_{ном,t,i}$, предназначенных для питания технологически связанных нагрузок в цехах, определяется на основе математической модели, принимая во внимание все параметры электрических систем и их взаимосвязь, что позволяет более точно и обоснованно рассчитать необходимое количество оборудования для обеспечения стабильности электроснабжения. Эти параметры и расчетное количество трансформаторов определяется с использованием специально разработанных формул, предназначенных для каждого конкретного трансформаторного подстанции (ТП), что позволяет учитывать все особенности нагрузки и условий эксплуатации в процессе работы предприятия:

$$N_{min,j} = P_{p.сумj} / (k_{з,j} \cdot S_{ном,Т,i}) + \Delta N_j, \quad (18)$$

где $P_{p.сумj}$ – из таблицы 3 для j -го цеха;

$k_{з,j}$ – «рекомендуемый коэффициент загрузки трансформатора от j -го цеха» [9];

ΔN_j – «добавка до ближайшего целого числа j -го цеха» [9].

«Экономически обоснованное число трансформаторов $N_{min,j}$ » [8]:

$$N_{\text{опт.}j} = N_{\text{min.}j} + m, \quad (19)$$

где m – «дополнительно установленные трансформаторы» [8].

«Число m принимает значения в зависимости от $N_{\text{min.}j}$ и ΔN_j » [8].

«Рассчитаем число и мощности цеховых трансформаторов на примере ККЦ» [8]:

$$G_{\text{н.ККЦ}} = \frac{3268,53}{7000} = 0,467 \frac{\text{кВА}}{\text{м}^2},$$

$$N_{\text{min.ККЦ}} = \frac{2288,19}{0,7 \cdot 2500} + 0,8 = 2 \text{ шт.},$$

$$N_{\text{опт.ККЦ}} = 2 + 0 = 2 \text{ шт.}$$

Результаты аналогичных расчетов по другим ТП приведены в таблице 5.

Таблица 5 – «Выбор оптимального числа и мощности цеховых трансформаторов» [8]

Номер ТП	Номер цеха	$S_{\text{р.сум.}j}$, кВА	F_j , м^2	$G_{\text{н.}j}$, кВА/ м^2	$N_{\text{опт.}j}$, шт	$k_{3,j}$	$S_{\text{ном.т.}j}$, кВА
1	1,2	1464,28	6590	0,22	2	0,7	$1 \times (2 \times 1600)$
2	3	3268,53	7000	0,467	2	0,7	$1 \times (2 \times 2500)$
3	4,5	2720,76	6830	0,36	2	0,7	$1 \times (2 \times 2500)$
4	8,10,12	2779,77	10140	0,30	2	0,8	$1 \times (2 \times 1000)$
5,6	6,7,9,11,13	3745,69	24490	0,14	4	0,7	$2 \times (2 \times 1000)$

Мощность трансформаторов и их количество были определены с учетом возможности расширения производственных мощностей в будущем, а также с предвидением увеличения потребности в потребляемой энергии, что является важным аспектом для планирования устойчивости энергоснабжения в долгосрочной перспективе.

«В цехе №2 предполагается установка двухтрансформаторной комплектной трансформаторной подстанции (КТП) на ТП–1, от которой будет обеспечиваться стабильное электроснабжение этого цеха, а также смежного цеха №1» [8], что «обеспечит бесперебойную работу обоих объектов на протяжении всего производственного цикла» [8].

В цехе №3 предварительно планируется установка двухтрансформаторной КТП на ТП–2, которая «будет полностью обеспечивать необходимое электроснабжение для технологических процессов этого цеха, что позволит достичь высокого уровня надежности в работе электросети данного участка предприятия» [8].

В цехе №5 предполагается «размещение трансформаторной подстанции ТП–3, от которой будет подаваться электроэнергия для обеспечения работы этого цеха, а также для питания смежного цеха №4, что позволяет оптимизировать распределение нагрузки на сеть и улучшить эксплуатационные характеристики электроснабжения» [8].

В цехе №8 планируется «установка трансформаторной подстанции ТП–4, которая будет обеспечивать стабильное электроснабжение для цехов №10 и №12, что даст возможность эффективно управлять энергетическими потоками и повысить надежность системы электроснабжения на уровне всего производственного комплекса» [8].

В цехах №6 и №9 «предполагается установка двухтрансформаторных КТП на ТП–5 и ТП–6, что позволит равномерно распределить электрическую нагрузку среди всех цехов, поскольку от ТП–5 будет подаваться питание для цехов №6 и №7, а от ТП–6 – для цехов №9, №11 и №13» [8], что способствует оптимальному распределению энергии и снижению рисков перегрузки сети.

Все приведенные данные были получены в ходе преддипломной практики, в ходе которой проводился комплексный анализ потребности в

энергии и оценки эффективности распределения электрических нагрузок на различных участках предприятия.

«Мощность компенсирующих устройств ($Q_{\text{кy}}$) определяется» [6]:

$$Q_{\text{кy}} = Q_{\text{м}} - Q_{\text{э}}, \quad (20)$$

где « $Q_{\text{м}}$ – максимальная реактивная нагрузка промышленного предприятия в часы наибольших нагрузок энергосистемы;

$Q_{\text{э}}$ – экономически целесообразная величина реактивной мощности, которую энергосистема может передать промышленному предприятию в часы максимума электрических нагрузок» [6]

«В общем виде экономически целесообразное значение реактивной мощности ($Q_{\text{э}}$) определяется» [6]:

$$Q_{\text{э}} = P_{\text{р}\Sigma} \cdot \text{tg} \varphi_{\text{э}}, \quad (21)$$

$$\text{tg} \varphi_{\text{э}} = \frac{\text{tg} \varphi_{\text{б}}}{K \cdot (0,4d + 0,6)}, \quad (22)$$

где « $P_{\text{р}\Sigma}$ – расчетная активная нагрузка ТП;

$\text{tg} \varphi_{\text{э}}$ – экономический коэффициент реактивной мощности» [6].

$\text{tg} \varphi_{\text{б}}$ – «базисное значение тангенса, который принимается для шин 6–10 кВ промышленного предприятия в зависимости от величины высшего напряжения ГПП. В проекте $U_{\text{ном.в}} = 110$ кВ, то $\text{tg} \varphi_{\text{б}} = 0,5$ » [6];

K – «коэффициент принимаемый в зависимости от энергосистемы, $K = 0,9$ » [6];

d – «отношение электроэнергии, потребляемой за квартал максимальных нагрузок энергосистемы к электроэнергии, потребляемой предприятием в квартале его максимальных нагрузок, $d \leq 1$ » [6], принимаем $d = 1$

$$\operatorname{tg} \varphi_3 = \frac{0,5}{0,9 \cdot (0,4 \cdot 1 + 0,6)} = 0,55.$$

«Расчетная полная мощность ТП с учетом компенсации реактивной мощности ($S_{p, \text{тп}}$)» [8]:

$$S_{p, \text{тп}} = \sqrt{P_{p\Sigma}^2 + (Q_{p\Sigma} - Q_{\text{ку, пр}})^2}, \quad (23)$$

где $Q_{\text{ку, пр}}$ – «принятая к установке мощность компенсирующих устройств» [6].

Пример расчета для ККЦ:

$$Q_3 = 2288,19 \cdot 1,05 = 2402,29 \text{ квар},$$

$$Q_{\text{ку}} = 2333,98 - 2402,59 = 68,62 \text{ квар},$$

$$S_{p, \text{тп}} = \sqrt{2288,19^2 + (2333,98 - 75)^2} = 3215,4 \text{ кВА}$$

«Принимаем стандартное значение мощности компенсирующего устройства $Q_{\text{ку, пр}} = 75$ квар» [21]. «Выбор мощности КУ других заводских подразделений в таблице 6. Принимаем к установке модули НБК по 75 и 50 квар» [21].

Таблица 6 – «Выбор мощности компенсирующих устройств» [21]:

Номер ТП	$P_{p\Sigma}$, кВт	$Q_{p\Sigma}$, квар	Q_3 , квар	$Q_{\text{ку}}$, квар	$Q_{\text{ку, пр}}$, квар	$S_{p, \text{тп}}$, кВА	Мощность ТП, кВА
1	1163,68	887,96	639,1	246,9	250	1324,5	2×1600
2	2288,19	2333,98	2402,29	68,62	75	3215,4	2×2500
3	2163,0	1668,3	1189,7	478,6	500	2458,4	2×2500

Продолжение таблицы 6

Номер ТП	$P_{p\Sigma}$, кВт	$Q_{p\Sigma}$, квар	Q_{Σ} , квар	$Q_{ку}$, квар	$Q_{ку,пр}$, квар	$S_{p,тп}$, кВА	Мощность ТП, кВА
4	2193,5	1647,3	1206,4	440,9	450	2499,0	2×2500
5,6	2647,5	2134,4	1456,1	678,3	675	3023,1	2× (2×1000)

2.4 Проектирование схемы внутреннего электроснабжения

Внутрицеховые электросетевые системы, предназначенные «для питания силовых и осветительных электроприемников, работающих при номинальном напряжении, не превышающем 1000В, обычно используют три основных уровня напряжения, включая 220/127В, 380/220В и 660/380В. В тех случаях, когда необходимо питать потребителей, расположенных в помещениях с повышенной или особо опасной опасностью, применяются низкие напряжения, не превышающие 42В, например, 12В, 24В и 36В» [14]. Решение о выборе конкретного уровня напряжения принимается с учетом значений потребляемой мощности электроприемников, что позволяет эффективно подобрать оптимальный режим работы.

Использование напряжения 220/127В для питания электроприемников на производственных объектах в большинстве случаев не является экономически оправданным и нецелесообразным, поскольку оно приводит к значительным потерям электроэнергии, а также требует большего расхода цветных металлов, что значительно увеличивает затраты на эксплуатацию. Данный уровень напряжения применяется исключительно в тех случаях, когда необходимо обеспечить повышенные требования безопасности, в том числе в тех технологических процессах, где возможен высокий риск поражения электрическим током.

Для питания низковольтных потребителей на заводе, как правило, применяется напряжение 380/220В, что является наиболее экономически

выгодным решением, поскольку оно сочетает в себе оптимальные условия для эффективной работы оборудования при минимальных затратах энергии. «В частности, силовое оборудование на заводе обычно работает при напряжении 380В, в то время как осветительные системы питаются от сети с напряжением 220В, что позволяет обеспечить необходимую степень безопасности и стабильность работы электрических систем. При этом при подключении питания от общих трансформаторов следует учитывать существующие ограничения, связанные с возможными колебаниями напряжения, что важно для соблюдения норм безопасности и эффективной работы системы» [14].

«В соответствии с требованиями ПУЭ, величина колебаний напряжения в системах освещения не должна превышать 1,5%, если частота этих колебаний превышает 10 раз в час. В связи с этим потребители освещающих систем должны подключаться исключительно к тем секциям сборных шин, где отсутствуют потребители с высокими пиковыми нагрузками, так как это позволяет избежать непредсказуемых изменений напряжения, что может негативно сказаться на функционировании осветительных систем» [14].

«В соответствии с ПУЭ для питания осветительных установок рекомендуется использовать напряжение, не превышающее 250В относительно земли, что связано с требованиями по безопасности эксплуатации электрического оборудования в промышленных условиях» [14]. В связи с этим нейтральная точка сети 380/220В должна быть надежно заземлена, обеспечивая стабильное соединение с землей и гарантируя нулевой потенциал, что минимизирует риски электрических ударов и других аварийных ситуаций.

Электрические приемники, работающие от различных типов электросетей, могут быть классифицированы в зависимости от вида тока, на котором они работают, «и включают устройства, использующие сети переменного тока с промышленной стандартной частотой 50Гц, а также устройства, питающиеся от переменного тока с повышенной или пониженной

частотой, и приемники, работающие от постоянного тока. Все эти устройства предназначены для различных производственных процессов, и их выбор зависит от специфики технологических требований и условий эксплуатации» [14].

«На предприятии в основном используются электроприемники, работающие от сети переменного тока с стандартной частотой 50Гц, что обусловлено оптимальными техническими характеристиками и стабильностью работы в таких условиях» [14], а также соответствием требованиям современных стандартов электроснабжения для промышленных объектов.

2.5 Выбор вариантов схем электроснабжения

Распределение электроэнергии внутри производственных помещений и на территории завода может осуществляться по одной из нескольких схем: магистральной, радиальной или комбинированной, что позволяет выбрать наиболее подходящий вариант в зависимости от специфики завода, его технологических процессов и требований к надежности энергоснабжения.

«Выбор схемы распределения энергии непосредственно зависит от таких факторов, как категория надежности потребителей электроэнергии, их территориальное размещение в рамках промышленного комплекса, а также специфические особенности режимов работы как отдельных потребителей, так и всего предприятия в целом» [14].

При детальном анализе и выборе наиболее оптимальных вариантов распределения электроэнергии учитываются не только экономические и технические показатели, но и конструктивное исполнение сетевых узлов, что играет ключевую роль в обеспечении надежности всей системы, а также способы транспортировки и канализации электроэнергии, которые могут быть выполнены как с использованием кабельных, так и шинных систем.

Для питания низковольтных потребителей на производственных объектах, в зависимости от типа работы и масштаба потребления, может быть применено несколько «вариантов схем распределения, которые обеспечат необходимую гибкость и надежность энергоснабжения, а для детального анализа рассматриваются радиальная схема (вариант I) и магистральная схема (вариант II)» [14]. Конкретные схемы электроснабжения для завода представлены на листе 2 графической части проекта, что позволяет наглядно оценить преимущества и недостатки каждой из них, а окончательный выбор будет сделан на основе проведения комплексного сравнительного технико-экономического анализа, который обеспечит оптимизацию работы сети. Канализация электроэнергии на предприятии осуществляется через кабельные линии, которые, в зависимости от условий эксплуатации и территориальных особенностей, могут прокладываться в земле в траншеях с применением кабеля, изготовленного из сшитого полиэтилена марки АПвП, что способствует повышению надежности и долговечности системы.

При выборе сечения кабеля для прокладки учитываются несколько факторов, среди которых основной является «экономическая плотность тока, а также нагрев, возникающий в процессе эксплуатации при утяжеленном рабочем режиме, что требует точных расчетов для обеспечения безопасности и эффективной работы электрической сети, а также соблюдения всех нормативных требований по термической стойкости кабеля» [14].

2.6 Выбор кабельных линий для вариантов схем электроснабжения

«Определение сечения кабельных линий по нагреву выполним с учетом влияния послеаварийного режима по следующему критерию» [1]:

$$I_{\text{раб.ут}} \leq I_{\text{доп}} \cdot k_{\text{пер}} \cdot k_t \cdot k_n, \quad (24)$$

где $I_{\text{раб.ут}}$ – «расчетный рабочий ток, протекающий по кабельной линии в аварийном режиме, А» [1];

$k_{\text{пер}}$ – «коэффициент перегрузки кабельной линии до 10 кВ, включительно, которая допускается на время ликвидации послеаварийного режима, и определяется по специальной таблице» [1], $k_{\text{пер}}=1,25$;

k_t – «поправочный коэффициент на токи для кабельных линий в зависимости от температуры земли и воздуха, определяется по специальной таблице» [1], $k_t=1,05$.

k_n – «поправочный коэффициент на количество работающих кабельных линий, лежащих рядом в земле, определяется по специальной таблице» [1], $k_n=0.92$ – для двух кабелей с расстоянием в свету 200 мм;

$I_{\text{доп}}$ – «допустимый длительный ток для кабелей с алюминиевыми жилами с бумажной изоляцией проложенных в земле, А, определяется по специальной таблице» [1].

Проведем расчет сечения кабельной линии по экономической плотности тока. Экономически выгодное сечение:

$$S_{\text{эк}} = \frac{I_{\text{р.ном}}}{j_{\text{эк}}}, \quad (25)$$

где $I_{\text{р,ном}}$ – «расчетный ток кабельной линии в час максимума энергосистемы, А» [1].

$j_{\text{эк}}$ – «нормированное значение экономической плотности тока, А/мм², для заданных условий работы, принимаем равным 1,4 – для кабельных линий с алюминиевыми жилами бумажной изоляцией при числе часов использования максимума нагрузки 5000 часов» [1].

«Проверка на термическую стойкость» [12]:

$$F_{T, \text{мин}} = \frac{I_k \cdot \sqrt{t_{\Pi}}}{C_T}, \quad (26)$$

$$t_{\Pi} = t_{p.з} + t_{\text{откл.в}} + T_a \quad (27)$$

где « I_k – ток короткого замыкания на шинах ГРУ, $I_k=8$ кА;

t_{Π} – приведенное время длительности тока КЗ;

$t_{p.з}$ – время срабатывания релейной защиты, $t_{p.з}=0.1$ с» [12];

$t_{\text{откл.в}}$ – «время отключения выключателя, $t_{\text{откл.в}}=0,095$ с» [12];

T_a – «постоянная времени апериодической составляющей тока КЗ,

$T_a=1,045$ с при $k_{уд}=1.8$ » [12];

C_T – «тепловая функция при номинальных условиях, $C_T=94$ А·с²/мм²» [12].

$$t_{\Pi} = 0,1 + 0,095 + 1,045 = 0,24 \text{ с},$$

$$F_{T, \text{мин}} = \frac{8 \cdot \sqrt{0,24}}{94} = 41,7 \text{ мм}^2.$$

«Ток в кабеле при нормальном режиме работы» [12]:

$$I_{p. \text{номк}} = \frac{S_{p,к}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}, \quad (28)$$

где $S_{p,к}$ – «полная расчетная мощность, передаваемая по кабельной линии в нормальном режиме, кВА;

$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение кабельной линии, $U_{\text{ном}}=10$ кВ» [12].

$$I_{p. \text{номккц}} = \frac{3215,4}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10} = 68,2 \text{ А},$$

$$S_{\text{эк}} = \frac{68,2}{1,4} = 48,7 \text{ мм}^2.$$

«Ток в кабеле при послеаварийном режиме» [12]:

$$I_{p.утк} = \frac{S_{p,к}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}, \quad (29)$$

где $S_{p,к}$ – «полная расчетная нагрузка k -ой кабельной линии, питающая i -ю ТП и определяющаяся как сумма расчетных нагрузок всех электроприемников присоединенных к данной ТП» [12].

$$I_{p.утккц} = \frac{2361}{\sqrt{3} \cdot 10} = 136,4 \text{ А.}$$

Принимаем к проекту один кабель стандартного значения сечением $S_{эк}=50 \text{ мм}^2$, с длительно допустимым током проводника $I_{доп}=140 \text{ А}$.

Проверяем по нагреву:

$$I_{раб.утру} \leq I_{доп} \cdot k_{пер} \cdot k_t \cdot k_n,$$

$$136,4 < 140 \cdot 1,25 \cdot 1,05 \cdot 0,92 = 169,05 \text{ А.}$$

Условие выполняется. «Таким образом, для питания ТП–2 от ГРУ используем кабель типа АПвП (3×50) сечением $S=50 \text{ мм}^2$ с $I_{дл.доп}=140 \text{ А}$.

Расчет по выбору проводников для радиальной схемы электроснабжения приведен в таблице 7, а для магистральной в таблице 8» [12].

Таблица 7 – Выбор кабельных линий для радиальной схемы (I вариант)

Питающие линии	$S_{p,к}$, кВА	$I_{p.ном,к}$, А	$I_{p.ут,к}$, А	$I_{дл.доп,к}$, А	$S_{эк,к}$, мм^2	$S_{т.ст}$, мм^2	Количество кабелей (жил и сечение), мм^2
ЗРУ–ТП1	1324,5	38,2	76,4	90	27,3	50	3×50
ЗРУ–ТП2	2361,0	68,2	136,3	140	48,7	50	3×50
ЗРУ–ТП3	2458,4	71,0	142,0	140	50,7	50	3×50
ЗРУ–ТП4	1515,6	43,6	87,2	90	31,1	50	3×50

Продолжение таблицы 7

Питающие линии	$S_{p,k}$, кВА	$I_{p.ном,k}$, А	$I_{p.ут,k}$, А	$I_{дл.доп,k}$, А	$S_{эк,k}$, мм ²	$S_{т.ст.}$, мм ²	Количество кабелей (жил и сечение), мм ²
ЗРУ–ТП5	1951,5	56,3	112,7	140	40,2	50	3×50
ЗРУ–ТП6	1515,6	43,6	87,2	90	31,1	50	3×50

Таблица 8 – Выбор кабельных линий для магистральной схемы (II вариант)

Питающие линии	$S_{p,k}$, кВА	$I_{p.ном,k}$, А	$I_{p.ут,k}$, А	$I_{дл.доп,k}$, А	$S_{эк,k}$, мм ²	$S_{т.ст.}$, мм ²	Количество кабелей (жил и сечение), мм ²
ЗРУ–ТП1	3685,5	106,4	212,8	205	76,0	50	3×95
ТП1–ТП2	2361,0	68,2	136,4	140	48,7	50	3×50
ЗРУ–ТП3	4409,9	127,3	254,6	240	90,9	50	3×120
ТП3–ТП4	1951,5	56,3	112,6	140	40,2	50	3×50
ЗРУ–ТП5	3031,2	87,5	175,0	165	62,5	50	3×70
ТП5–ТП6	1515,6	43,8	87,6	140	31,3	50	3×50

Затраты на прокладку кабелей меньше во II варианте схемы электроснабжения – в магистральной схеме.

Данную схему выбираем в качестве основной и отображаем ее на листе графической части проекта.

2.7 Схема электроснабжения выходного дня завода

Повышение надежности и эффективности работы электроэнергетических систем является одной из главных задач современной электроэнергетики. Для обеспечения эффективного распределения электроэнергии по цеху необходимо тщательно выбрать наиболее оптимальные и рациональные схемы электрической сети, которые будут соответствовать всем техническим требованиям и обеспечивать стабильную работу системы. Эти схемы должны гарантировать необходимую степень надежности, которая будет зависеть от

категории электроприемников, их характеристик и особенностей эксплуатации, а также должны учитывать потенциальные риски, которые могут возникнуть в процессе работы. Кроме того, проектируемая сеть должна обеспечивать высокий уровень безопасности как для обслуживающего персонала, так и для всех других участников процесса, что является обязательным условием для функционирования промышленных объектов. Важно, чтобы выполнение электромонтажных работ с использованием промышленных методов способствовало повышению эффективности и сокращению времени на их реализацию. Также следует учитывать, что схема должна предоставлять максимальные удобства для эксплуатации, а также обеспечивать наглядность и простоту в обслуживании всей системы. Кроме того, для оптимизации процессов работы необходимо минимизировать потери электроэнергии, что позволит значительно повысить общую энергоэффективность. В конечном итоге, проектируемая сеть должна быть экономичной, что подразумевает сокращение капитальных затрат на ее сооружение без ущерба для функциональности и надежности.

Режимы работы потребителей электрической энергии постоянно изменяются в течение времени, и эти изменения могут происходить не только в течение суток, но и на протяжении недель, месяцев и даже в зависимости от сезона, что влияет на колебания потребляемой мощности.

Эти изменения происходят не только в течение суток, но и могут длиться в течение недель, месяцев и даже целого года, что оказывает значительное влияние на баланс нагрузки на электроснабжение и требует учета долгосрочных колебаний потребности в энергии.

Вследствие изменений в режиме работы потребителей электроэнергии, нагрузка на все элементы системы передачи и распределения электроэнергии будет колебаться, что потребует учета этих изменений при проектировании и эксплуатации распределительных сетей.

Наряду с изменениями в нагрузке на элементы системы распределения, аналогичные колебания происходят и в нагрузке на генераторы электрических станций, что требует постоянного контроля за рабочими режимами генераторов и их способности поддерживать стабильное снабжение.

Для визуализации и более наглядного представления этих изменений на практике широко используется метод построения графиков нагрузки, которые помогают прогнозировать изменения в потреблении энергии и адаптировать систему электроснабжения к изменяющимся условиям.

На рисунке 2 приведен график нагрузки, который наглядно отображает изменения в потреблении электроэнергии на заводе, что позволяет анализировать колебания нагрузок и разрабатывать эффективные стратегии управления энергоснабжением.

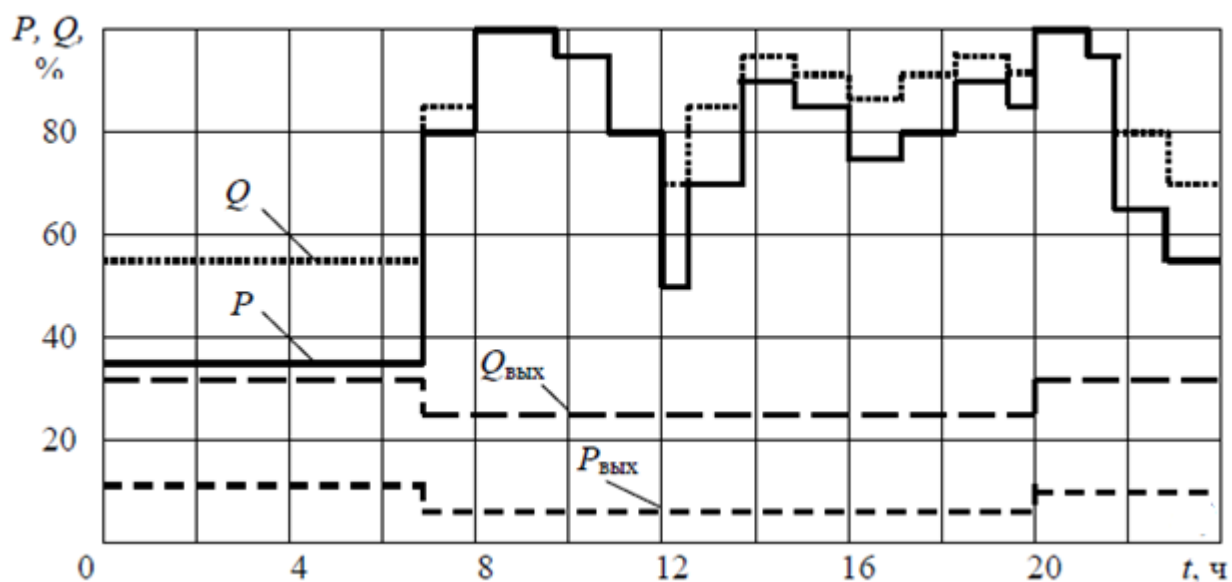


Рисунок 2 – Суточный график электрических нагрузок завода: P, Q – активная и реактивная нагрузка рабочего дня; P_{вых}, Q_{вых} – активная и реактивная нагрузка выходного дня

В цехах, где установлены несколько трансформаторных подстанций, часто предусматривается использование схемы выходного дня, которая

позволяет более гибко регулировать потребление энергии в зависимости от рабочих и праздничных дней, обеспечивая рациональное использование энергетических ресурсов.

В рамках данной схемы предусмотрено отключение части трансформаторов в праздничные дни, что позволяет снизить общий уровень потребления энергии и тем самым уменьшить затраты на электроэнергию в периоды низкого спроса.

В то время как отключенные трансформаторы не функционируют, остальные трансформаторы продолжают работать, обеспечивая бесперебойное питание для освещения и силовых электроприемников, что способствует поддержанию стабильного энергетического снабжения в период эксплуатации.

В такой конфигурации обеспечивается возможность проведения необходимых ремонтных работ на отключенных трансформаторах, что не нарушает работу системы и позволяет своевременно устранять потенциальные неисправности без ущерба для работы всего завода.

Однако, согласно проведенным расчетам, создание схемы выходного дня с применением специальных шинопроводов и секционных автоматических выключателей оказывается нецелесообразным, поскольку экономия на потере мощности в трансформаторах не компенсирует затраты на реализацию этой схемы.

В связи с этим, целесообразно рассматривать более простое и эффективное решение, которое будет включать использование коротких перемычек, рассчитанных на токи до 600 А, между ограниченным числом трансформаторов, что обеспечит необходимую гибкость при меньших затратах.

Например, можно использовать короткие перемычки, которые рассчитаны на небольшие токи (до 600 А), между ограниченным числом трансформаторов, что позволяет обеспечить необходимую гибкость работы системы и улучшить эффективность без существенных дополнительных затрат.

Электроснабжение завода, занимающегося производством автомобильных дисков, организовано с использованием магистральной схемы, которая позволяет эффективно распределять энергию и обеспечивать питание всех цехов и производственных подразделений.

Хотя магистральные схемы имеют несколько меньшую степень надежности по сравнению с радиальными схемами, это решение оправдано в контексте обеспечения гибкости и возможностей для дальнейшего расширения производственных мощностей.

В случае повреждения магистральной линии одновременно могут быть отключены все распределительные магистрали, пункты, распределительные щиты и мощные электроприемники, что может привести к значительным сбоям в обеспечении энергоснабжения на объекте.

Несмотря на указанные недостатки, использование магистральных схем имеет ряд значительных преимуществ, таких как возможность быстро адаптировать систему под изменения в потребности в энергии, а также гибкость в проектировании и эксплуатации распределительных сетей.

Это решение позволяет отказаться от установки громоздких низковольтных распределительных устройств на подстанциях, что снижает капитальные затраты и повышает общую экономическую эффективность системы электроснабжения.

Кроме того, использование магистральной схемы обеспечивает высокую гибкость и универсальность всей электрической сети, что делает систему более адаптируемой к изменениям в производственных требованиях и возможным модернизациям.

Кроме того, магистральные схемы предоставляют возможность легко добавлять новые нагрузки в систему, что особенно важно в условиях динамичного роста производства и изменения производственных мощностей. Этот факт особенно полезен при совершенствовании технологического

процесса или реконструкции предприятия, так как не требует значительных изменений в инфраструктуре электроснабжения, что значительно упрощает процесс модернизации.

Перемещение технологического оборудования и модификации в производственной линии не требуют значительных изменений в распределительной сети, что сокращает расходы и сроки, связанные с реконструкцией сети.

Магистральные схемы обеспечивают возможность создания резервных путей питания для электроприемников, что значительно повышает общую надежность системы и минимизирует вероятность перебоев в электроснабжении.

Для этого на участках сближения магистралей разных подстанций устанавливаются нормально–разомкнутые перемычки, которые позволяют создать резервные пути питания и снизить вероятность отказа в случае аварийных ситуаций.

Это решение позволяет применять магистральные схемы для питания электроприемников второй категории по надежности электроснабжения, что обеспечивает необходимый уровень энергоснабжения и минимизирует риски при возникновении непредвиденных обстоятельств.

В некоторых случаях, чтобы более эффективно распределять электроэнергию по цехам и учесть специфику производственных процессов, применение магистральных или радиальных схем в их чистом виде становится невозможным, и требуется использование смешанных схем.

В таких случаях оптимальным решением становится использование смешанной схемы, которая комбинирует элементы как магистрального, так и радиального питания, что позволяет более гибко подходить к распределению энергоресурсов.

2.8 Расчет и выбор выключателей

Точки возникновения короткого замыкания, принятые в учебных проектах, представлены на рисунке 3.

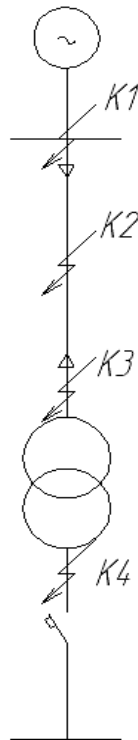


Рисунок 3 – Характерные точки короткого замыкания

Задаемся параметрами короткого замыкания [18]:

- ток периодического КЗ в точке 1 – 7,98 кА;
- ток периодического КЗ в точке 2 – 7,839 кА;
- ток периодического КЗ в точке 3 – 22,668 кА;
- ток периодического КЗ в точке 4 – 22,456 кА;
- ударный ток КЗ в точке 1 – 20,31 кА;
- ударный ток КЗ в точке 2 – 18,433 кА;
- ударный ток КЗ в точке 3 – 48,568 кА;

- ударный ток КЗ в точке 4 – 47,536 кА;
- ударный коэффициент в точке 1 – 1,8;
- ударный коэффициент в точке 2 – 1,663;
- ударный коэффициент в точке 3 – 1,515;
- ударный коэффициент в точке 4 – 1,497.

Произведем расчеты для выключателей Q₁ и Q₂ (лист 3 графической части проекта) .

«Расчетные токи продолжительного режима» [17]:

$$I_{p.ном} = \frac{S_{pv}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_H}, \quad (30)$$

$$I_{p.ут} = \frac{S_{pv}}{\sqrt{3} \cdot U_H}, \quad (31)$$

где U_н – «номинальное напряжение сети;

S_{pv} – расчетная нагрузка» [17]

$$I_{p.ном} = \frac{11044.2}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10} = 318,82 \text{ A},$$

$$I_{p.ут} = \frac{11044.2}{\sqrt{3} \cdot 10} = 637,6 \text{ A}.$$

«Апериодическая составляющая тока КЗ к моменту времени τ» [17]:

$$\tau = t_{откл.собс} + t_{защ.мин}. \quad (32)$$

где t_{откл.собс} – «время собственного отключения выключателя (каталожные данные)» [17];

t_{защ.мин} – «минимальное время защиты при срабатывании» [17];

τ – «время от начала КЗ до прекращения соприкосновения дугогасительных контактов, с» [17].

$$\tau = 0.07 + 0.01 = 0.08 \text{ с}.$$

Действующее значение аperiodической составляющей тока КЗ:

$$I_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{п.о}^{(3)} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 7,98 \cdot e^{\frac{-0,08}{0,05}} = 2,28A, \quad (33)$$
$$\sqrt{2} \cdot I_{п,\tau} + i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot 7,98 + 2,28 = 13,5kA.$$

Импульс квадратичного тока:

$$B_k = I_{п.о}^2 (t_{откл} + T_a), \quad (34)$$
$$B_k = 7,98^2 \cdot (1,2 + 0,095) = 1,295kA^2 \cdot c.$$

Выбираем выключатель (на вводе) ВМПЭ–10–1000–20У3 [3].

«Аналогично производим выбор выключателей Q4 и Q7 (лист 3 графической части проекта). Они одинаковые, т.к., оба питают РП–3. Выбираем выключатель типа ВМПЭ–10–630–20У3» [4].

«Для остальных РП выбираем, как удовлетворяющий всем требованиям выбора, аналогичный выключатель типа ВМПЭ–10–630–20У3» [4].

2.9 Выбор выключателей нагрузки и предохранителей

«Выключатели нагрузки и предохранители различаются по номинальному напряжению ($U_{ном}$), номинальному току ($I_{ном}$) и проверяют на стойкость к КЗ, кроме предохранителей. Выключатель нагрузки дополнительно выбирают по току отключения ($I_{ном.откл}$)» [2]:

$$I_{ном.откл} \geq I_{раб.ут}, \quad (35)$$

где $I_{\text{раб.ут}}$ – «рабочий ток утяжеленного режима» [2].

Выбираем на стороне 10 кВ цехового трансформатора выключатель нагрузки ВНПу–10/400–10зУ3 [5], предохранитель ПКТ104–10–200–12,5У3 [11].

2.10 Выбор и проверка шинной конструкции

«Выбираем сечение шин по экономической плотности тока ($S_{\text{эк}}$)» [23]:

$$S_{\text{эк}} = \frac{I_{\text{раб.ном}}}{j_{\text{эк}}}, \quad (36)$$

$$I_{\text{р.ном}} = \frac{S_{\text{нг}}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}, \quad (37)$$

$$I_{\text{р.ут}} = \frac{S_{\text{нг}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}, \quad (38)$$

где « $I_{\text{раб.ном}}$ – рабочий ток нормального режима, А;

$j_{\text{эк}}=1.1 \text{ А/мм}^2$ – экономическая плотность тока, для неизолированных проводов и шин» [23].

« $S_{\text{нг}}$ – суммарная нагрузка всех трансформаторных подстанций (ТП)» [23].

$$I_{\text{р.ном}} = \frac{22200}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10} = 640,9 \text{ А},$$

$$I_{\text{р.ут}} = \frac{22200}{\sqrt{3} \cdot 10} = 1281,7 \text{ А},$$

$$S_{\text{эк}} = \frac{640,9}{1,1} = 582,6 \text{ мм}^2$$

Выбираем сечение (80×8) мм².

«Сечение проверяем на нагрев в рабочем утяжеленном режиме» [23]:

$$I'_{\text{дл.доп}} \geq I_{\text{раб.ут}}; \quad (39)$$

$$I'_{\text{дл.доп}} = I_{\text{дл.доп}} \cdot k_g = I_{\text{дл.доп}} \cdot \sqrt{\frac{\vartheta_{\text{дл.доп}} - \vartheta_o}{\vartheta_{\text{дл.доп}} - \vartheta_{o.\text{ном}}}}, \quad (40)$$

где « $I_{\text{дл.доп}}$ – длительно–допустимый ток, $I_{\text{дл.доп}} = 1320 \text{ А}$ » [23];

« k_g – коэффициент, учитывающий отличие температуры окружающей среды от номинальной;

$\vartheta_{o.\text{ном}}$ – номинальная температура воздуха, $+25^\circ\text{C}$ » [23];

$\vartheta_{\text{дл.доп}}$ – «длительно–допустимая температура воздуха, $+70^\circ\text{C}$ » [23];

ϑ_o – «температура окружающей среды, $+20^\circ\text{C}$ » [23].

$$k_g = \sqrt{\frac{70 - 20}{70 - 25}} = 1,054,$$

$$1320 \cdot 1,054 > 1281,7,$$

$$1391,3 > 1281,7.$$

Условия выполняются, значит, сечение шин выбрано верно.

2.11 Релейная защита кабельной линии между ГРУ и цеховой ТП

«В схеме защиты с отсечкой, которая выполняется с использованием реле РТ–40, как это представлено на рисунке 4, в выходную цепь защиты обязательно включается промежуточное реле, которое имеет важную функцию — обеспечение надежного отключения выключателя в случае возникновения короткого замыкания, а также некоторую отстройку от возможных бросков апериодической составляющей тока короткого замыкания. Это реле также имеет важное значение для устранения влияния бросков намагничивающих токов, которые возникают в силовых трансформаторах, питающихся по

«Т – цеховой трансформатор; Q – высоковольтный выключатель типа ВПМЭ–10–630–20УЗ; ТА1...ТА3 – трансформаторы тока типа ТПЛ–10–200 УЗ; КА1...КА7 – реле тока РТ–40; КТ – реле времени типа РВ; КЛ – реле промежуточное типа РП–23; КН1, КН2 – реле указательные типа РУ–1; SF – воздушный выключатель серии ВА» [31]; KQT – контакт реле положения выключателя Q «отключено».

47

Токовая отсечка (ТО) представляет собой один «из основных методов защиты, где первичный ток срабатывания токовой отсечки ($I_{с.зТО}$) вычисляется исходя из условия, что защита должна не срабатывать в случае трехфазного короткого замыкания, происходящего в конце защищаемой линии, и таким образом, обеспечивается надежное и точное функционирование системы защиты в условиях нормальной эксплуатации» [22]:

$$I_{с.зТО} \geq k_{отс} \cdot I_K^{(3)} \cdot \frac{U_H}{U_B}, \quad (41)$$

где $k_{отс}$ – «коэффициент отстройки, $k_{отс} = 1,4$;

$I_K^{(3)}$ – периодический ток трехфазного КЗ на стороне НН защищаемого трансформатора в точке КЗ, $I_K^{(3)} = 22,668$ кА;

U_B и U_H – номинальные напряжения трансформатора на высшем и низшем сторонах, соответственно 10 кВ и 0.4 кВ» [16].

$$I_{с.зТО} = 1,4 \cdot 22,668 \frac{0,4}{10} = 1,27 \text{ кА.}$$

Ток срабатывания реле токовой отсечки ($I_{с.рТО}$) определяется:

$$I_{с.рТО} = \frac{I_{с.зТО} \cdot k_{сх}}{k_{ТА}}, \quad (42)$$

$$k_{ТА} = \frac{I_{1,НОМ}}{I_{2,НОМ}}, \quad (43)$$

где $k_{сх}$ – «коэффициент схемы соединения ТТ, при включении реле тока на ток фазы, $k_{сх} = 1$ » [16];

$k_{ТА}$ – «коэффициент трансформации ТТ» [16];

$I_{1,НОМ}$ и $I_{2,НОМ}$ – «первичный и вторичный токи выбранного ТТ, соответственно 200А и 5А» [16].

$$k_{TA} = \frac{I_{1,ном}}{I_{2,ном}} = \frac{200}{5} = 40,$$

$$I_{с.рТО} = \frac{1,27 \cdot 1,0}{40} = 31,75A$$

«Коэффициент чувствительности токовой отсечки ($k_{чТО}$) проверяется при двухфазном КЗ» [16]:

$$k_{чТО} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_K^{(3)}}{I_{с.зТО}} \geq 1,5, \quad (44)$$

где $\frac{\sqrt{3}}{2}$ – «коэффициент перехода с трехфазного КЗ на двухфазное» [16];

$I_K^{(3)}$ – трехфазный ток КЗ для точки №1, $I_K^{(3)} = 7,98$ кА.

$$k_{чТО} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{7,98}{1,17} = 5,4 \geq 1,5.$$

«Условие выполняется, следовательно, токовая отсечка обладает достаточной степенью чувствительности» [7].

«Максимальная токовая защита.

Первичный ток срабатывания МТЗ ($I_{с.зМТЗ}$) установленной на линии, выбирается из условий отстройки от наибольшего тока нагрузки» [7]:

$$I_{с.зМТЗ} = \frac{k_{отс} \cdot k_{с.з,п} \cdot I_{раб.ут}}{k_B}, \quad (45)$$

где $k_{отс}$ – «коэффициент отстройки для МТЗ, $k_{отс} = 1,2$ » [7];

$k_{с.з,п}$ – «коэффициент самозапуска двигателей, $k_{с.з,п} = 1,25$ » [7];

$I_{раб.ут}$ – «рабочий ток в послеаварийном режиме, А, $I_{раб.ут} = 175$ А» [7];

k_B – «коэффициент возврата реле, $k_B = 0,85$ » [7].

$$I_{c.3MT3} = \frac{1,2 \cdot 1,25175}{0,85} = 308,82 A.$$

«Ток срабатывания реле МТЗ (I_{cpMT3}) определяется» [7]:

$$I_{cpMT3} = \frac{I_{c.3M} \cdot k_{cx}}{k_{TA}}, \quad (46)$$

$$I_{cpMT3} = \frac{308,82 \cdot 1,0}{40} = 7,72$$

«Минимальный ток реле ($I_{cp.minMT3}$) при двухфазном КЗ за трансформатором, на вводе НН» [7]:

$$I_{cp.minMT3} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_k^{(3)}}{k_{TA}} \cdot \frac{U_H}{U_B}, \quad (47)$$

$$I_{cp.minMT3} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{22,668}{40} \cdot \frac{0,4}{10} = 19,63 A$$

«Чувствительность защиты ($k_{чMT3}$) при двухфазном КЗ в конце линии» [7]:

$$k_{чMT3} = \frac{I_{cp.minMT3}}{I_{cp.MT3}}, \quad (48)$$

$$k_{чMT3} = \frac{19,63}{7,72} = 2,5 \geq 1,5$$

Таким образом, МТЗ обладает достаточной степенью чувствительности при двухфазном КЗ, следовательно, и при трехфазном КЗ.

Выводы по разделу 2.

В данном разделе выполнено проектирование системы электроснабжения, в том числе выполнен расчет электрических нагрузок, рассчитано и выбрано основное силовое, коммутационное и защитное оборудование. В схеме защиты с отсечкой использование промежуточного реле, обеспечивающее надежное отключение выключателя при коротком замыкании и защиту от бросков апериодической составляющей тока, повышая устойчивость системы. Токовая отсечка и МТЗ являются основными методами защиты, обеспечивающими безопасность и бесперебойность работы энергосистемы за счет быстрого срабатывания в аварийных режимах. Расчеты первичного и вторичного токов срабатывания, а также коэффициента чувствительности подтверждают, что токовая отсечка эффективно отстраивается от токов КЗ и обладает достаточной чувствительностью при двухфазных замыканиях. МТЗ настраивается с учетом отстройки от максимального тока нагрузки и самозапуска двигателей, а ее чувствительность проверяется для различных режимов КЗ, включая двухфазные замыкания на стороне низкого напряжения трансформатора.

3 Безопасность проекта

3.1 Основные меры по электробезопасности завода

«Электробезопасность – это система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

При разработке мероприятий по обеспечению электробезопасности необходим учет класс производственного помещения по опасности поражения током.

Опасность электрического тока в отличие от других усугубляется тем, что человек не в состоянии в большинстве случаев без специальных приборов обнаружить электрическое напряжение до 1000 В» [25].

«Проходя через живые ткани организма человека, электрический ток оказывает термическое, электродинамическое и биологическое воздействие, что приводит к различным нарушениям жизнедеятельности, вызывая как местное поражение тканей и отдельных органов, так и общее поражение организма» [25].

«Согласно ПУЭ для защиты людей от поражения электрическим током при повреждении изоляции применяется, по крайней мере, одна из следующих мер: заземление, зануление, защитное отключение, разъединительный трансформатор, малое напряжение, двойная изоляция, выравнивание потенциалов. В авторемонтном заводе применяется заземление электроустановок.

Для обеспечения обслуживающего персонала от действия электрического тока, на действующем заводе технологическое оборудование заземлено. Цель

заземления – отвод с корпусов и шкафов силовых установок опасных потенциалов в землю.

Заземлением какой-либо части электроустановки или другой установки называется преднамеренное электрическое соединение этой части с заземляющим устройством. Заземляющим устройством называется совокупность заземлителя и заземляющих проводников» [14].

Заземлителем называют совокупность металлических соединенных между собой проводников (электродов), находящихся в соприкосновении с землей. Различают искусственные и естественные заземлители.

«Опасность поражения электрическим током возникает при использовании неисправных ручных электрифицированных инструментов, при работе с неисправными рубильниками и предохранителями, при соприкосновении с воздушными и настенными электропроводками, а также – случайно оказавшимися под напряжением металлическими конструкциями.

Электрифицированный инструмент (дрели, гайковерты, шлифовальные машины и др.) включают в сеть напряжением 220 В. Разрешается работать только инструментами, имеющими защитное заземление. Штепсельные соединения для включения инструмента имеют заземляющий контакт, который длиннее рабочих контактов и отличается от них по форме. При включении инструмента в сеть заземляющий контакт входит в соединение со штепсельной розеткой первым, а при выключении выходит последним» [25].

«Работать с электрифицированным инструментом при рабочем напряжении, превышающем 42 В, можно только в диэлектрических перчатках стоя на изолированной поверхности (резиновом коврике, сухом деревянном щитке). Во избежание поражения электрическим током пользуются переносными электролампами с предохранительными сетками. В помещении без повышенной опасности (сухом, с нетокопроводящими полами) можно использовать переносные лампы напряжением до 42 В, а в особо опасных

помещениях (сырых, с токопроводящими полами или токопроводящей пылью) напряжение не должно превышать 12 В» [25].

«Все рабочие места в цехах содержатся в чистоте, не загромождаются деталями, оборудованием, приспособлениями. На рабочем месте имеются необходимые оборудование, приспособления и инструмент. Все оборудование и инструмент, запасные части, приспособления располагают в непосредственной близости в пределах зоны досягаемости. В помещениях запрещается оставлять порожнюю тару из-под смазочных материалов» [25].

«Мероприятия по охране труда являются составной частью коллективного договора предприятия. В дополнение к коллективному договору администрация и местный комитет заключают соглашение по охране труда для уточнения перечня и сроков осуществления планов (номенклатурных) мероприятий. Разлитое масло или топливо необходимо немедленно удалять при помощи песка или опилок, которые после употребления следует ссыпать в металлические ящики с крышками, установленные вне помещения. Использованные обтирочные материалы (промасленные концы, тряпки и пр.) убираются в металлические ящики с плотными крышками, а по окончании рабочего дня удаляются в безопасное в пожарном отношении место» [25].

3.2 Расчет защитного заземления электроустановок трансформаторной подстанции

Расчет сопротивления заземления ТП–4 произведем в следующем порядке. «В соответствии с ПУЭ устанавливают допустимое сопротивление заземляющего устройства.

Принимаемые значения $R_3=10$ Ом – для сети с изолированной нейтралью напряжением 10 кВ, и $R_3=4$ Ом – для сети 380 В и сети с глухозаземленной нейтралью, глава 1.7 ПУЭ» [14].

«В качестве вертикальных заземлителей применяем стальные стержни диаметром $d=15$ мм, длиной $l_b=2$ м, которые погружаются в грунт методом ввертывания. Верхние концы электродов располагаются на глубине 0,7м от поверхности земли. К ним привариваются горизонтальные электроды стержневого типа, изготовленные из той же стали, что и вертикальные заземлители» [14].

«Предполагается сооружение заземлителя с внешней стороны здания с расположением вертикальных электродов по периметру.

Состав почвы – суглинок, климатическая зона 3.

Предварительно с учетом площади, занимаемой объектом, намечаем расположение заземлителей – по периметру с расстоянием между вертикальными электродами $l_2 = 2$ м» [14].

«Сопротивление искусственного заземлителя при отсутствии естественных заземлителей принимаем равным допустимому сопротивлению заземляющего устройства $R_3=R_n=4$ Ом» [14].

«Определим расчетные удельные сопротивления грунта для горизонтальных ($\rho_{p.g}$) и вертикальных ($\rho_{p.v}$) заземлителей» [14]:

$$\rho_{p.g} = \rho_{уд} \cdot k_{п.г} = 40 \cdot 2,5 = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}, \quad (49)$$

$$\rho_{p.v} = \rho_{уд} \cdot k_{п.в} = 40 \cdot 1,3 = 52 \text{ Ом} \cdot \text{м}, \quad (50)$$

где $\rho_{уд}$ – «удельное сопротивление грунта (для глины), $\rho_{уд}=40$ Ом·м» [15];

« $k_{п.г}$ и $k_{п.в}$ – повышающие коэффициенты для горизонтальных и вертикальных электродов соответственно» [15] для климатической зоны №3, $k_{п.г}=2,5$ и $k_{п.в}=1,3$.

«Сопротивление растекания одного вертикального электрода стержневого типа определяется ($R_{o.в.э}$)» [15]:

$$R_{o.в.э} = \frac{\rho_{p.в}}{2 \cdot \pi \cdot l_{в}} \left(\ln \frac{2 \cdot l_{в}}{d} + 0,5 \cdot \ln \frac{4 \cdot t + l_{в}}{4 \cdot t - l_{в}} \right), \quad (51)$$

$$R_{o.в.э} = \frac{52}{2\pi \cdot 2} \left(\ln \frac{2 \cdot 2}{15 \cdot 10^{-3}} + 0,5 \cdot \ln \frac{4 \cdot 1,7 + 2}{4 \cdot 1,7 - 2} \right) = 24,38 \text{ Ом},$$

где $l_{в}$ – «длина вертикального электрода, применяем длиной 2 м» [15];

d – «диаметр стержневого электрода, 15 мм» [15];

t – расстояние от центра электрода до поверхности земли, 1,7 м.

«Определим примерное число вертикальных заземлителей (N)» [24]:

$$N_{\text{ориент}} = \frac{R_{o.в.э}}{R_{и}} = \frac{24,38}{4} = 6,095 \approx 6. \quad (52)$$

«Ориентировочное значение коэффициента использования вертикальных заземлителей $k_{и.в}=0,7$ » [24].

$$N = \frac{R_{o.в.э}}{k_{и.в} \cdot R_{и}} = \frac{24,38}{0,7 \cdot 4} = 8,7 \approx 9 \text{ шт}, \quad (53)$$

Следовательно, $k_{и.в}=0,69$.

«Определим расчетное сопротивление растекания горизонтальных электродов ($R_{o.г.э}$)» [24]:

$$R_{o.г.э} = \frac{\rho_{p.г}}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l^2}{2 \cdot d \cdot t}, \quad (54)$$

где l – длина периметра контура горизонтального электрода, $l=30$ м;

t – «расстояние от центра горизонтального электрода до поверхности земли, $t=0,7$ м.» [24].

$$R_{o.г.э} = \frac{100}{2 \cdot \pi \cdot 30} \ln \frac{30^2}{2 \cdot 15 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7} = 5,66 \text{ Ом.}$$

Уточняем необходимое сопротивление вертикального электрода ($R_{в.э}$):

$$R_{в.э} = \frac{R_{o.г.э} \cdot R_{и}}{R_{o.г.э} - R_{и}}, \quad (55)$$

$$R_{в.э} = \frac{5,66 \cdot 4}{5,66 - 4} = 13,6 \text{ Ом.}$$

Рассчитаем сопротивление заземляющих устройств ($R_{расч}$):

$$R_{расч} = \frac{R_{o.в.э} \cdot R_{o.г.э}}{R_{o.в.э} \cdot k_{и.г} + R_{o.г.э} \cdot k_{и.в} \cdot N}, \quad (56)$$

$$R_{расч} = \frac{24,38 \cdot 5,66}{24,38 \cdot 0,43 + 5,66 \cdot 0,75 \cdot 6} = 3,83 \text{ Ом.}$$

Сравниваем полученное сопротивление ($R_{расч}$) с нормированным значением (R_3). Условие $R_3 \geq R_{расч}$, $4,00 \text{ Ом} > 3,83 \text{ Ом}$ выполняется.

Таким образом, выбор заземляющего устройства произведен верно. Применяем к монтажу 6 вертикальных стальных электродов с расстоянием между ними 3,0 м, расположенных по контуру ТП–4

Выводы по разделу 3.

В данном разделе рассмотрены вопросы безопасности при эксплуатации системы электроснабжения завода, описаны меры, исключающие возможность поражения электрическим током, рассчитали защитное заземление трансформаторной подстанции ТП–4.

Заключение

В рамках данной выпускной квалификационной работы проведено исследование системы электроснабжения промышленного предприятия, занимающегося производством автомобильных дисков. Указанное предприятие осуществляет изготовление литых и штампованных дисков для легковых и грузовых автомобилей. В ходе проектирования системы электроснабжения были выполнены расчеты электрических нагрузок заводских потребителей. Для выполнения расчетов использовался метод коэффициента спроса, учитывающий неравномерность нагрузки. Полученные результаты расчетов были применены в качестве исходных данных для последующих разделов проекта. Помимо этого, в рамках проекта последовательно реализованы следующие этапы проектирования.

На основе технико-экономического анализа была определена оптимальная схема внутреннего электроснабжения. Выбор данной схемы был обоснован результатами сравнительного анализа различных вариантов. Подбор силовых трансформаторов для цеховых подстанций выполнялся с учетом необходимости компенсации реактивной мощности. Для обеспечения надежности системы выполнены расчеты токов короткого замыкания в различных точках сети. В соответствии с расчетными данными был произведен подбор защитных аппаратов. Особое внимание уделено анализу релейной защиты, обеспечивающей безопасность эксплуатации электроустановок.

С учетом нагрузочных характеристик осуществлен выбор распределительного электрооборудования. В проекте проведена комплексная оценка мер электробезопасности в соответствии с нормативными требованиями. Дополнительно рассмотрена схема работы предприятия в выходные и праздничные дни.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Выбор кабеля, питающего силовой пункт [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Studfile.net». URL: <https://studfile.net/preview/7130218/page:5/> (дата обращения: 15.01.2025 г)
2. Выбор правильного выключателя [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Direct Industry». URL: <https://guide.directindustry.com/ru/vybor-pravilnogo-vyklyuchatelya/> (дата обращения: 16.01.2025 г)
3. Выключатель масляный ВМПЭ–10–1000 [Электронный ресурс] : URL: <https://podstanciya-ktp.ru/product/34660722-vyklyuchatel-maslyanyj-vmpe-10-1000> (дата обращения: 21.01.2025 г)
4. Выключатель масляный ВМПЭ–10–630–20 Уз [Электронный ресурс] : URL: <https://ueprofi.com/vyklyuchatel-vmpe-10-630-20-u3> (дата обращения: 21.01.2025 г)
5. Выключатель нагрузки ВНР–10/400 УХЛ2 [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Электро Арсенал». URL: https://www.elektroarsenal74.ru/goods/20688659-vyklyuchatel_nagruzki_vnr_10_400 (дата обращения: 17.01.2025 г)
6. Компенсация реактивной мощности на промышленных предприятиях [Электронный ресурс] : Информационный портал «Миркон» URL: <https://www.mircond.com/blog/kompensatsiya-reaktivnoy-moshchnosti-na-promyshlennyykh-predpriyatiyakh/> (дата обращения: 10.01.2025 г)
7. Максимальная токовая защита от перегрузки [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «StudFiles.Net»: URL: <https://studfile.net/preview/5762448/page:25/> (дата обращения: 12.01.2024).
8. Нугманов С.С. Расчет трансформаторной подстанции : методические указания для выполнения курсовой работы по дисциплине «Электрические

станции и подстанции» [Электронный ресурс] : URL: https://ssaa.ru/svedeniya/education/fak_ingener/metod/metod_disc_110302_elektrifikaciya_i_avtomatizaciya.pdf (дата обращения: 11.01.2025 г)

9. Определение потерь в трансформаторе [Электронный ресурс] : Информационный портал «ProTransformatory.Ru» URL: <https://protransformatory.ru/raschety/poteri-v-transformatore> (дата обращения: 11.01.2025 г)

10. Основы расчета систем внутризаводского электроснабжения [Электронный ресурс] : URL: https://portal.tpu.ru/SHARED/s/SUMAROK/educationwork/Tab1/Methodical_instructions.pdf (дата обращения: 03.01.2025)

11. Предохранитель ПКТ–104–10–200–12,5–УЗ–КЭАЗ [Электронный ресурс] : Официальный сайт завода «КЭАЗ». URL: <https://keaz.ru/catalog/product/120518> (дата обращения: 17.01.2025 г)

12. Проверка кабелей электроустановок напряжением до 1 кВ на термическую стойкость и невозгорание [Электронный ресурс] : URL: <http://es.mpei.ac.ru/Publish/Electro2001.htm> (дата обращения: 16.01.2025 г)

13. Производство штампованных и литых дисков [Электронный ресурс] : Официальный сайт группы компаний «ЯрШинТорг»: URL: <https://yst.ru/about/production/> (дата обращения: 10.01.2025)

14. ПУЭ–7. Правила устройства электроустановок. Издание 7 [Электронный ресурс] : Информационный портал «Техэкспо». URL: <https://tech-expo.ru/pue/> (дата обращения: 12.01.2025 г)

15. Расчет заземляющих устройств [Электронный ресурс] : URL: https://websor.ru/normy/sistemj_zazemleniya/ras_els/http://eneropro.ru/catalog/565/ (дата обращения: 04.01.2025 г)

16. Расчет МТЗ трансформатора [Электронный ресурс] : информационный ресурс «Проект РЗА»: URL: <https://pro-rza.ru/raschet-mtz-transformatora-10-0-4-kv/> (дата обращения: 15.01.2025).

17. Расчет токов коротких замыканий и замыканий на землю в распределительных сетях [Электронный ресурс] : URL: https://www.mtrele.ru/files/project/raschet_ustavok/raschet_tokov_korotkih_zamykaniy_i_zamykaniy_na_zemlyu_v_raspredelitelnyh_setyah.pdf (дата обращения: 08.01.2025 г)

18. Расчет токов короткого замыкания [Электронный ресурс] : URL: <https://ekfgroup.com/ru/calculators/mastertool/short-circuit> (дата обращения: 21.01.2025 г)

19. Расчет электрических нагрузок 0,4 кВ [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Studwood.Net»: URL: https://studwood.net/2116535/matematika_himiya_fizika/raschet_elektricheskikh_nagruzok (дата обращения: 12.01.2025).

20. Расчет электрических нагрузок методом упорядоченных диаграмм [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Energy-Systems». URL: <https://energy-systems.ru/main-articles/proektirovanie-elektriki/1836-raschet-jelektricheskikh-nagruzok-metodom-uporjadochennyh-diagramm> (дата обращения 17.01.2025)

21. Рекомендации по выбору компенсирующего устройства [Электронный ресурс] : Официальный сайт электротехнического завода «СлавЭнерго»: URL: <https://slavenergo.ru/ukrm> (дата обращения: 11.01.2025)

22. Релейная защита и автоматика силовых масляных трансформаторов до 110 кВ [Электронный ресурс] : Информационный портал «Школа для электрика». URL: <https://electricalschool.info/relay/1947-relejjnaja-zashhita-i-avtomatika.html> (дата обращения: 13.01.2025 г)

23. Электрическая часть электростанций – выбор токоведущих частей распределительных устройств [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Forca». URL: <https://forca.ru/knigi/arhivy/elektricheskaya-chast-elektrostantsiy-71.html> (дата обращения: 17.01.2025 г)

24. Электрическая часть электростанций – схема расчета заземления [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «Forca» : URL <https://forca.ru/knigi/arhivy/elektricheskaya-chast-elektrostantsiy-110.html> (дата обращения: 19.01.2025 г)

25. Электробезопасность на электрической подстанции [Электронный ресурс] : URL: <https://nikaexp.ru/2024/01/04/ehlektrobezopasnost-ehlektricheskaya-podstanciya/> (дата обращения: 21.01.2025 г)

26. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений [Электронный ресурс] : Информационный ресурс «СибАДИ». URL: https://portal.sibadi.org/pluginfile.php/170513/mod_folder/content/0/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F%2012.pdf?forcedownload=1 (дата обращения 07.01.2025).

27. Calculating Electric Power [Electronic resource] : URL: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-2/calculating-electric-power/> (date of access: 06.01.2025 г)

28. Load centers: Fundamentals of electrical load centers [Electronic resource] : URL: <https://www.eaton.com/us/en-us/products/low-voltage-power-distribution-control-systems/loadcenters/load-center-fundamentals.html> (date of access: 09.01.2025 г)

29. Naustrial Power Engineering and Applications Handbook [Electronic resource] : URL: [https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/ADVANCED%20ENGINE%20TECHNOLOGY%20AND%20PERFORMANCE/Industrial%20Power%20Engineering%20and%20Applications%20Handbook%20\(%20PDFDrive%20\).pdf](https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/ADVANCED%20ENGINE%20TECHNOLOGY%20AND%20PERFORMANCE/Industrial%20Power%20Engineering%20and%20Applications%20Handbook%20(%20PDFDrive%20).pdf) (date of access: 14.01.2025 г)

30. Selection and application of power transformers [Electronic resource] : URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6437032> (date of access: 11.01.2025 г)

31. What is transformer gas protection [Electronic resource] : URL:
<https://www.scotech-electrical.com/info/what-is-transformer-gas-protection-79379009.html> (date of access: 13.01.2025 г)