

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 Реконструкция РП 10 кВ торгового центра

Обучающийся

Д.П. Бычков

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент С.В. Шаповалов

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

Тольятти 2024

## Аннотация

В работе проведена реконструкция схемы электрических соединений системы электроснабжения распределительного пункта напряжением 10 кВ, питающего торговый центр (далее – РП-10 кВ ТЦ).

Такая реконструкция обусловлена несоответствием установленным нормам по качеству и надёжности, схемы электрических соединений питающей сети объекта исследования.

Кроме того, установлено, что помимо реконструкции схемы, некоторое оборудование питающей и распределительной сети системы электроснабжения (далее – СЭС) РП-10 кВ ТЦ устарело и требует срочной замены, так как значительно увеличилось количество аварий на объекте. Таким образом, в работе осуществлена комплексная замена устаревшего оборудования на объекте исследования совместно с реконструкцией схемы главных электрических соединений.

Для достижения поставленной цели, в работе проведено решение следующих практических задач:

- выбор и обоснование технических изменений, рекомендованных для внесения в схему СЭС РП-10 кВ ТЦ;
- расчёт электрических нагрузок (освещения, силовой и суммарной);
- расчёт токов короткого замыкания;
- выбор и проверка кабелей и коммутационной аппаратуры;
- расчёт и выбор системы релейной защиты и автоматики для применения в СЭС РП-10 кВ ТЦ.

Работа содержит пояснительную записку на 63 страницах и 6 чертежей формата А1.

## Содержание

Введение .....	4
1 Анализ исходных данных по электроснабжению торгового центра .....	7
1.1 Исходная система электроснабжения торгового центра .....	7
1.2 Решение проблемы резервирования в системе электроснабжения торгового центра .....	13
2 Расчёт системы электроснабжения торгового центра .....	16
2.1 Реконструкция схемы электроснабжения торгового центра .....	16
2.2 Расчёт электрических нагрузок .....	20
2.3 Выбор и расчёт числа и мощности трансформаторов подстанций .....	25
2.4 Выбор компенсирующих устройств .....	28
2.5 Расчёт токов короткого замыкания .....	32
2.6 Выбор и расчёт проводников .....	40
2.7 Выбор основного оборудования и его проверка .....	45
3 Выбор и расчёт релейной защиты и контура заземления .....	51
3.1 Выбор устройств релейной защиты и автоматики .....	51
3.2 Расчёт контура заземления торгового центра .....	56
Заключение .....	60
Список используемых источников .....	62

## **Введение**

Торговые центры являются современными объектами экономики торговых объектов, включающей реализацию продажи и покупки товаров оптом и в розницу.

Современные торговые центры являются разнообразными по насыщению товарами, предлагая покупателям товары пищевой и непищевых групп, которые можно приобрести в одном здании, что является большим преимуществом и удобством как для покупателей, так и для продавцов.

Торговые площадки, которые сдаются в аренду в помещениях торгового центра, позволяют развивать торговые отношения между покупателями и продавцами, а также налаживать логистические связи для доставки и реализации товаров, таким образом, стимулируя развитие торговых отношений не только в регионе, но и в стране в целом.

Питание торговых центров электроэнергией обеспечивается, как правило, от источников энергосистемы: понизительных подстанций, распределительных пунктов, генерирующих узлов.

Электроснабжение торговых центров в Российской Федерации представляет собой комплексную задачу, требующую внимательного подхода к планированию и эксплуатации электрических сетей. Этот аспект особенно важен, учитывая, что торговые центры являются местами массового пребывания людей и осуществления широкого спектра хозяйственной деятельности, от розничной торговли до предоставления развлекательных и питательных услуг.

Основной целью системы электроснабжения для таких объектов является обеспечение непрерывного и качественного энергоснабжения, что критически важно для функционирования всех систем здания, начиная от освещения и кондиционирования воздуха, заканчивая работой лифтов и эскалаторов.

Важность надежного электроснабжения торговых центров также

усиливается требованиями пожарной безопасности и необходимостью обеспечения работы систем безопасности и видеонаблюдения, которые должны функционировать круглосуточно без сбоев.

Для обеспечения таких требований к электроснабжению торговых центров применяются различные инженерные решения, включая использование множественных источников питания для повышения надежности. Такие решения могут включать подключение к нескольким линиям электропередач, а также установку аварийных генераторов, которые могут автоматически включаться при сбоях в общей сети. Кроме того, применяются усовершенствованные системы управления и мониторинга, способные оперативно диагностировать проблемы и предотвращать аварийные ситуации путем быстрого реагирования на изменения в энергосистеме.

Также значимую роль играет выбор и качество используемого электротехнического оборудования. Компоненты системы, такие как трансформаторы, распределительные устройства и кабельные системы, должны соответствовать высоким стандартам качества и безопасности, чтобы выдерживать высокие нагрузки и обеспечивать длительный срок службы оборудования.

Интеграция энергоэффективных технологий, таких как светодиодное освещение и системы умного управления зданием, способствует не только снижению операционных расходов на электроэнергию, но и уменьшению экологического воздействия деятельности торговых центров.

В целом, система электроснабжения торговых центров в России должна соответствовать строгим нормам и стандартам, обеспечивая высокую эффективность и безопасность для всех посетителей и работников, что является ключевым фактором успешной эксплуатации таких объектов [20].

В работе рассматривается один из таких торговых центров, получающий питание от внешнего распределительного пункта (РП) номинальным напряжением 10 кВ энергосистемы.

Основной целью работы является реконструкция схемы электрических соединений системы электроснабжения распределительного пункта напряжением 10 кВ, питающего торговый центр. Такая реконструкция обусловлена несоответствием установленным нормам по качеству и надёжности, схемы электрических соединений питающей сети объекта исследования.

Кроме того, установлено, что помимо реконструкции схемы, некоторое оборудование питающей и распределительной сети системы электроснабжения (далее – СЭС) РП-10 кВ ТЦ устарело и требует срочной замены, так как значительно увеличилось количество аварий на объекте.

Таким образом, в работе планируется осуществить комплексную замену устаревшего оборудования на объекте исследования совместно с реконструкцией схемы главных электрических соединений.

Для достижения поставленной цели, в работе проводится решение следующих практических задач:

- выбор и обоснование технических изменений, рекомендованных для внесения в схему СЭС РП-10 кВ ТЦ;
- расчёт электрических нагрузок (освещения, силовой и суммарной);
- расчёт токов короткого замыкания;
- выбор и проверка кабелей и коммутационной аппаратуры;
- расчёт и выбор системы релейной защиты и автоматики для применения в СЭС РП-10 кВ ТЦ.

Таким образом, в работе на основе расчётных значений необходимо подтвердить предлагаемые технические изменения схемы объекта, полученные в результате проведения мероприятий по его реконструкции.

## **1 Анализ исходных данных по электроснабжению торгового центра**

### **1.1 Исходная система электроснабжения торгового центра**

Известно, что торговые центры являются современными объектами экономики торговых объектов, включающей реализацию продажи и покупки товаров оптом и в розницу.

Современные торговые центры являются разнообразными по насыщению товарами, предлагая покупателям товары пищевой и непищевых групп, которые можно приобрести в одном здании, что является большим преимуществом и удобством как для покупателей, так и для продавцов.

К такому типу торговых центров относится рассматриваемый в работе объект.

Электроснабжение торгового центра, рассматриваемого в работе, «осуществляется в соответствии с договором электроснабжения от сети ~220/380В вводного распределительного устройства (ВРУ-0,4 кВ)» [4].

«Питание ВРУ-0,4 кВ торгового центра осуществляется от однострансформаторной подстанции ТП-10/0,4 кВ, от которой также получают питание другие потребители.

Следовательно, данная ТП-10/0,4 кВ, от которой получает питание вся система электроснабжения торгового центра, будет единственным источником электроэнергии для данного объекта проектирования.

Далее проводится анализ исходных данных электрической части питающей понизительной подстанции переменного напряжения ТП-10/0,4 кВ торгового центра.

Данная понизительная подстанция территориально находится на балансе электрических сетей, обеспечивая питание электроэнергией промышленных и коммунальных потребителей города на номинальном напряжении 0,4 кВ. Она полностью обслуживается и ремонтируется работниками данного учреждения» [12].

«Понижительная подстанция ТП-10/0,4 кВ переменного напряжения системы электроснабжения объекта проектирования, по месту расположения в схеме электроснабжения города, является тупиковой распределительной понижающей подстанцией и играет важное значение в системе электроснабжения объектов городской коммунальной инфраструктуры.

Подстанция ТП-10/0,4 кВ системы электроснабжения объекта проектирования, является однострансформаторной комплектной подстанцией тупикового типа без резервирования на сторонах 10 кВ (ВН) и 0,4 кВ (НН).

Конструктивно ТП-10/0,4 кВ системы электроснабжения объекта проектирования, выполнена в виде комплектной трансформаторной подстанции наружной установки с кабельными вводами. Она была введена в эксплуатацию в 2017 году и с тех пор не реконструировалась.

В схеме РУ-10 кВ понизительной подстанции ТП-10/0,4 кВ переменного напряжения системы электроснабжения объекта проектирования, для питания сборных шин 10 кВ, применяется схема без наличия автоматического резервирования на стороне 10 кВ подстанции, что также соответствует условиям для питания только III категорий потребителей согласно нормам и требованиям» [10].

«На отходящих линиях в РУ-10 кВ понизительной подстанции переменного напряжения ТП-10/0,4 кВ системы электроснабжения объекта проектирования, установлены следующие основные защитные и коммутационные аппараты (графический лист 1):

- выключатель нагрузки марки ВНА-10/630-Л-з-ПТ1.3-И2-УХЛ2-КЭАЗ с ручным приводом марки с ручным приводом ПРБД-10 – 2 единицы (год изготовления – 2015, введён в эксплуатацию на подстанции в 2017 году);
- предохранители ПКТ-103-10 (однофазные) – 3 единицы (год изготовления – 2016, введены в эксплуатацию на подстанции в 2017 году)» [11].

«Питание РУ-10 кВ понизительной подстанции переменного напряжения ТП-10/0,4 кВ системы электроснабжения объекта проектирования от РП-10 кВ города, осуществляется кабельной линией с помощью одного силового кабеля марки АСБ-10 (3×35).

На данной ТП-10/0,4 кВ, установлен один силовой трансформатор марки ТМ-250/10 (изготовлен в 2009, год ввода в эксплуатацию на подстанции – 2017).

Далее рассматривается распределительное устройство номинальным напряжением 0,4 кВ ТП-10/0,4 кВ (далее – РУ-0,4 кВ) – конструктивно выполнено комплектным наружной установки с применением ячеек стационарного типа (год производства – 2016, введены в эксплуатацию на подстанции в 2017 году).

В схеме РУ-0,4 кВ ТП-10/0,4 кВ системы электроснабжения объекта проектирования, предусмотрена одна рабочая система сборных шин без резервирования.

Защита и коммутация схемы РУ-0,4 кВ подстанции обеспечивается автоматическими воздушными выключателями (автоматами), установленными в шкафах РУ-0,4 кВ подстанции.

Такая схема полностью соответствует условиям для питания III категорий потребителей согласно нормам и требованиям» [10].

Описанная ТП-10/0,4 кВ получает питание от сборных шин РП 10 кВ энергосистемы.

Данный РП 10 кВ сделан в виде закрытого распределительно пункта с установленными в середине камерами внутренней установки типа КВ-2004, в которых установлены высоковольтные выключатели вакуумного типа VD-4-10-8/630 У2, обеспечивающие коммутацию потребителей на напряжении 10 кВ.

Закрытый распределительный пункт с установленными камерами внутренней установки типа КВ-2004, оснащенный высоковольтными выключателями вакуумного типа VD-4-10-8/630 У2 для коммутации

потребителей на напряжении 10 кВ, представляет собой передовое решение в области распределения электроэнергии.

Данная конфигурация обладает рядом преимуществ и технических характеристик, делающих её особенно привлекательной для современных энергосистем.

Ключевое достоинство заключается в использовании вакуумных выключателей, которые являются одним из наиболее надежных и безопасных типов выключающих устройств.

Вакуумные выключатели обеспечивают высокую коммутационную способность, что критически важно для систем, работающих под высоким напряжением.

Известно, что такие современные устройства отличаются улучшенными эксплуатационными характеристиками, включая длительный срок службы и минимальное обслуживание, поскольку вакуум значительно уменьшает износ контактов и исключает необходимость частой замены или ремонта.

Закрытая конструкция распределительного пункта с камерами типа КВ-2004 способствует повышению безопасности персонала и защите оборудования от внешних воздействий, таких как пыль, влага и механические повреждения.

Данное обстоятельство делает подобные установки идеальными для использования в условиях повышенной влажности и загрязненности, что типично для промышленных предприятий.

Применение камер внутренней установки также улучшает общую эргономику и удобство обслуживания, что позволяет обеспечить доступ к каждому компоненту для проверки и обслуживания, минимизируя риск аварий и сокращая время, необходимое для диагностики и устранения неисправностей.

В целом, интеграция высоковольтных выключателей вакуумного типа и закрытой конструкции распределительного пункта создает эффективную и

надежную систему, способную обеспечить стабильное и безопасное электроснабжение, существенно повышая операционную эффективность и уменьшая операционные риски.

Внешний вид данного типа аппарата для его установки в РП 10 кВ с целью обеспечения коммутации потребителей на напряжении 10 кВ, представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Внешний вид высоковольтные выключатели вакуумного типа VD-4-10-8/630 У2, обеспечивающие коммутацию РП 10 кВ СЭС ТЦ

Конструкция ячейки РП 10 кВ представлена в графической части работы (лист 4).

Схема, которая применяется для РП 10 кВ – односекционная схема без резервирования, питание которого осуществляется одной высоковольтной «кабельной линией напряжением 10 кВ от питающей подстанции 35/10 кВ.

Такая схема соответствует условиям для питания только III категорий потребителей согласно нормам и требованиям документов.

От шин РУ-0,4 кВ ТП-10/0,4 кВ системы электроснабжения торгового центра, получают непосредственное питание потребители объекта» [10] проектирования.

Такая цепочка питания предусматривает следующие элементы: секция ВРУ-0,4 кВ – СРШ № 1-5 – одиночные потребители. Данная схема рассмотрена в работе далее.

«Как правило, силовые распределительные шкафы (СРШ) торгового центра располагаются у стен» [4] с внешней стороны, что обеспечивает лучший доступ к ним для проведения операций по монтажу, обслуживанию и ремонту оборудования, аппаратуры и проводников кабельных линий.

Для питания потребителей торгового центра предусмотрены пять трёхфазных СРШ.

«От СРШ по радиальной схеме получают питание трёхфазные потребители сети торгового центра.

Их количество обуславливается величиной нагрузки и её расположением на территории объекта» [17].

«Для защиты электрической силовой сети торгового центра от ненормальных режимов (токов КЗ, перегрузки) применяются автоматические выключатели.

В системе электроснабжения рассматриваемого торгового центра предусмотрены установки рабочего и аварийного освещения» [14].

Их вводные щитки получают питание отдельно друг от друга, по радиальной схеме от ВРУ-0,4 кВ торгового центра.

Защита и коммутация сети освещения осуществляется автоматами, установленными в них.

Исходные данные конечных потребителей торгового центра в зависимости от их мощности и суммарного числа в схеме, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Состав и характеристики потребителей торгового центра

Позиция на плане	$P_{ном}$ , кВт	Кол-во, шт.	Суммарная мощность, $P_{сум}$ , кВт
1	3,0	1	3,0
2	2,2	1	2,2
3	3,0	1	3,0
4	4,4	1	4,4
4.1	11,0	1	11,0
5	7,5	1	7,5
6	4,0	1	4,0
7	30,0	1	30,0
8 (8.1 – 8.2)	1,1	2	2,2
9 (9.1 – 9.3)	3,0	3	9,0
10 (10.1 – 10.4)	3,0	4	12,0
11	3,0	4	12,0
12	3,0	1	3,0
13	1,5	1	1,5
14	1,5	1	1,5
15 (15.1 – 15.2)	1,5	2	3,0
16	22,0	1	22,0
17 (17.1 – 17.2)	5,5	2	11,0
18 (18.1 – 18.2)	2,2	2	4,4
19 (19.1 – 19.2)	2,2	2	4,4
20	4,5	1	4,5
21	4,5	1	4,5
22	2,2	1	2,2
23	2,2	1	2,2
24 (24.1 – 24.2)	3,7	2	7,4
25 (25.1 – 25.2)	4,5	2	9,0
26 (26.1 – 26.2)	4,5	2	9,0
27	22,0	1	22,0
Всего по торговому центру		44	211,9

С учётом приведённых параметров, характеристик и исходных данных торгового центра, проводится решение задач.

## **1.2 Решение проблемы резервирования в системе электроснабжения торгового центра**

«Как было указано ранее, в схеме электроснабжения торгового центра существует основная проблема, которую необходимо решить путём внедрения мероприятий по реконструкции – недостаточное обеспечение резервирования во всех питающих узлах, а именно:

- в схеме РП 10 кВ (применяется одна, не секционированная, система сборных шин 10 кВ без резервирования, что соответствует питанию только потребителей III категории надёжности);
- в схеме питающей ТП-10/0,4 кВ, от которой питается торговый центр (применяется один силовой трансформатор и полностью отсутствует резервирование на сторонах 10 кВ и 0,4 кВ, что соответствует питанию только потребителей III категории надёжности)» [12];
- в схеме ВРУ-0,4 кВ торгового центра, от которого получают питание СРШ и потребители объекта (применяется одна, не секционированная, система сборных шин «0,4 кВ без резервирования, что соответствует питанию только потребителей III категории надёжности).

Учитывая то, что большинство потребителей торгового центра, недавно введённых в эксплуатацию, относятся ко II категории надёжности, следовательно, для их питания необходим второй источник» [12], который в исходной схеме отсутствует.

Таким образом, решение проблемы резервирования в схеме электроснабжения, необходимо решить путём реконструкции питания и схемы электрических соединений на следующих объектах (начиная от источника к потребителю):

- РП 10 кВ;
- ТП-10/0,4 кВ;
- ВРУ-0,4 кВ.

Применение схем резервирования на данных объектах полностью решит проблему несоответствия питания условиям и нормам нормативных документов [11].

Одной из требуемых задач в работе является реконструкция схемы РП 10 кВ, что соответствует теме данной работы.

Выбор и обоснование данных схем для питания СЭС ТЦ, проводится в работе далее.

Выводы по разделу.

При глубоком анализе питающих схем системы электроснабжения объекта, установлено, что схемы электроснабжения РП 10 кВ, ТП-10/0,4 кВ, а также ВРУ-0,4 кВ торгового центра выполнены без наличия резервирования и могут быть применены только для питания потребителей III категории надёжности.

В виду того, что «большинство потребителей торгового центра, недавно введённых в эксплуатацию, относятся ко II категории надёжности, следовательно, для их питания необходим второй источник» [12], который в исходной схеме отсутствует.

Таким образом, решение проблемы резервирования в схеме электроснабжения, необходимо решить путём реконструкции питания и схемы электрических соединений на следующих объектах (начиная от источника к потребителю): РП 10 кВ, ТП-10/0,4 кВ, ВРУ-0,4 кВ.

Установлено, что применение рациональных схем резервирования на данных объектах полностью решит данную проблему.

## **2 Расчёт системы электроснабжения торгового центра**

### **2.1 Реконструкция схемы электроснабжения торгового центра**

«Далее в работе необходимо провести аргументированный выбор мероприятий по реконструкции схемы электрических соединений системы электроснабжения торгового центра таким образом, чтобы в ней повысились показатели качества, надёжности, экономичности и безопасности» [12].

Как было установлено в результате выполнения первого раздела работы, в реконструкции нуждаются схемы:

- РП 10 кВ;
- ТП-10/0,4 кВ;
- ВРУ-0,4 кВ.

«При выборе схемы электроснабжения торгового центра, следует учитывать категорию надёжности как потребителей, так и всего объекта проектирования в целом, а также расположение источника питания и потребителей на территории объекта, мощность потребителей и объекта проектирования в целом» [4].

Решение поставленной задачи начинается с источника питания, на котором есть силовые трансформаторы – ТП-10/0,4 кВ. Далее, исходя из принятой схемы ТП-10/0,4 кВ, проводится реконструкция соответствующих элементов:

- питающего РП 10 кВ – со стороны источника питания РП 10 кВ на напряжении 10 кВ;
- распределительного ВРУ-0,4 кВ – со стороны потребителей торгового центра на напряжении 0,4 кВ.

При этом схемы СРШ остаются без изменений, так как в них все необходимые условия резервирования, надёжности и экономичности соблюдены.

«Схема электрических соединений ТП-10/0,4 кВ, полученная в результате проведения реконструкции, которая является источником электроэнергии для системы электроснабжения торгового центра» [12], представлена на рисунке 2.

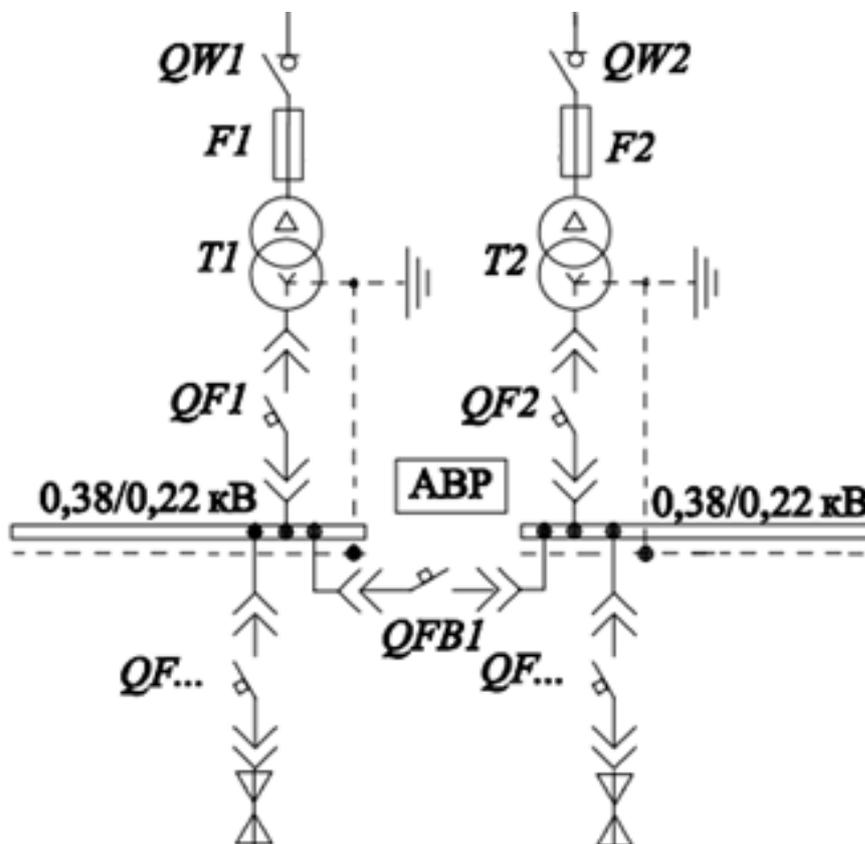


Рисунок 2 – «Схема электрических соединений питающей ТП-10/0,4 кВ системы электроснабжения торгового центра, полученная в результате реконструкции системы электроснабжения объекта» [12]

«Так как торговый центр относится к объектам средней мощности II категории надёжности, принимается питание от ТП-10/0,4 кВ ко ВРУ торгового центра по радиальной схеме двумя питающими пятижильными силовыми кабелями марки ВВГнг-LS, сечение которых выбирается и проверяется в работе далее» [7].

При этом схема электрических соединений питающей ВРУ-0,4 кВ системы электроснабжения торгового центра, полученная в результате реконструкции системы электроснабжения объекта, будет иметь две секции сборных шин с резервированием и АВР между ними [16].

Новая выбранная схема, применяемая на питающем ВРУ-0,4 кВ СЭС ТЦ, представлена в работе на рисунке 3.

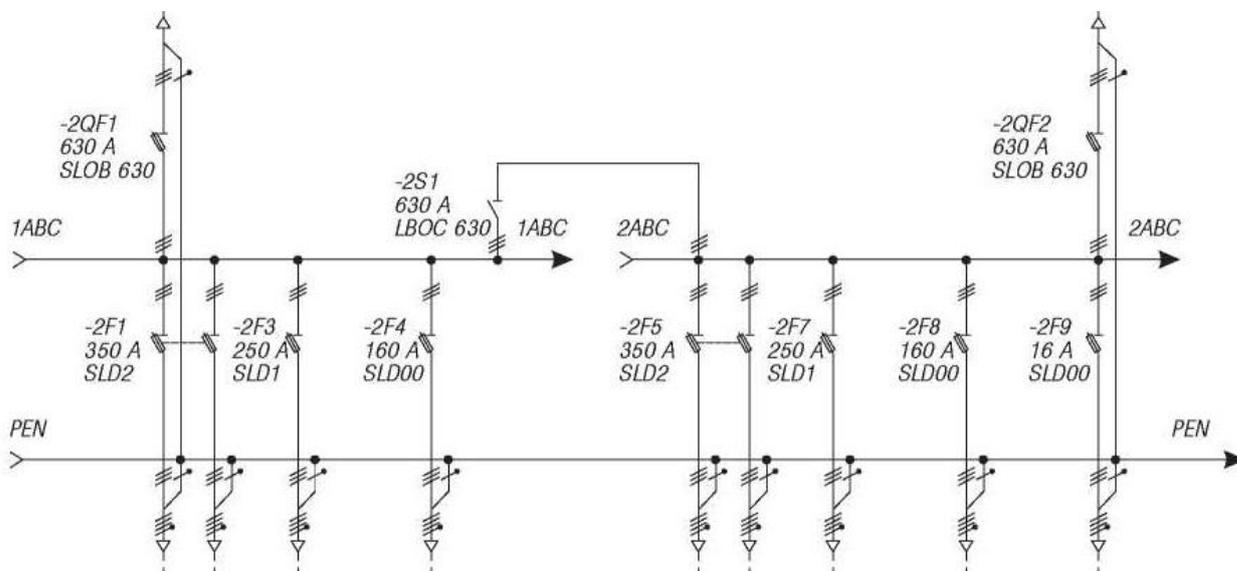


Рисунок 3 – Новая выбранная схема, применяемая на питающем ВРУ-0,4 кВ СЭС ТЦ

В схеме на рисунке 3 «питание каждого щитка (ЩАО и ЩО) осуществляется отдельно друг от друга по радиальной схеме от разных секций сборных шин ВРУ торгового центра, так как щитки рабочего и аварийного освещения должны иметь различные источники питания по условию резервирования» [11].

Исходя из того, что на питающей ТП-10/0,4 кВ торгового центра в результате реконструкции было установлено два трансформатора и обеспечено резервирование двух источников питания, на питающем РП 10 кВ также принимается две секции сборных шин с резервированием секционным выключателем.

Данная схема показана на рисунке 4.

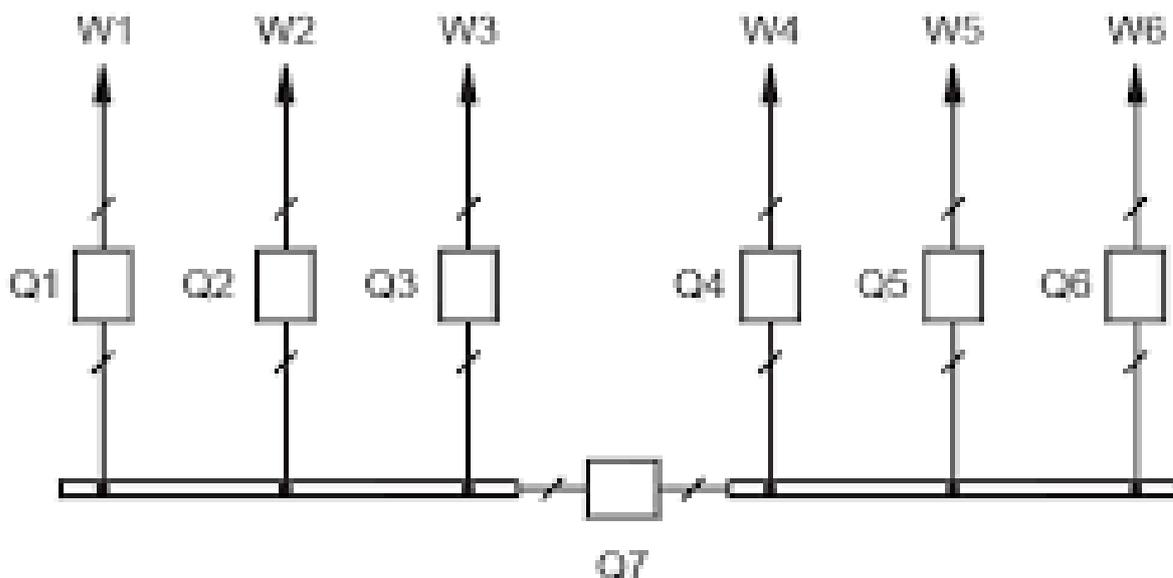


Рисунок 4 – «Схема электрических соединений питающего РП 10 кВ СЭС ТЦ» [11]

«Принятая в работе схема системы электроснабжения обеспечивает бесперебойное питание силовой и осветительной сети торгового центра и обеспечивает необходимую надёжность потребителей, а также экономичность передачи электроэнергии и безопасность людей согласно требованиям и нормам» [4].

«Такая схема обеспечит значительно более высокий уровень надёжности с применением условий резервирования и секционирования, что положительно скажется на бесперебойном электроснабжении потребителей объекта исследования.

Принятая в работе общая принципиальная схема электроснабжения питающей и распределительной силовой сети, после выбора соответствующего оборудования внешней и внутренней системы (проводников и аппаратов защиты)» [8], приводится на графическом листе 3 работы. Таким образом, в результате выбора схемных решений установлено, что все принятые изменения для внесения в схему СЭС ТЦ, рекомендуемые на всех уровнях данного объекта, актуальны и приведут к улучшению производительности и повышению показателей надёжности, экономичности и безопасности.

## 2.2 Расчёт электрических нагрузок

Как было указано ранее, в исходную схему электроснабжения торгового центра были внесены следующие качественные изменения, позволяющие обеспечить необходимый уровень резервирования потребителей объекта, путём проведения реконструкции следующих основных составляющих схемы, а именно:

- РП 10 кВ;
- ТП-10/0,4 кВ;
- ВРУ-0,4 кВ.

Все данные аспекты необходимо отразить при расчёте электрических нагрузок торгового центра.

«Расчетные нагрузки торгового центра определяется методом коэффициента спроса» [7].

Расчет нагрузки торгового центра методом коэффициента спроса является одним из наиболее эффективных методов для определения требуемой мощности электроснабжения. Этот метод учитывает максимальные и минимальные значения потребления электроэнергии за определенный период, позволяя точно прогнозировать потребности в электроснабжении на основе реального использования оборудования и систем здания.

Применение коэффициента спроса обладает рядом значимых преимуществ. Во-первых, он позволяет более рационально подходить к проектированию систем электроснабжения, так как учитывает не только пиковые, но и фактические продолжительные нагрузки, что способствует оптимизации расходов на электроэнергию. Это становится возможным благодаря точному определению максимальных нагрузок, которые могут возникать в разные временные промежутки, обеспечивая таким образом оптимальную нагрузку для удовлетворения всех потребностей.

Во-вторых, использование коэффициента спроса позволяет улучшить надежность электроснабжения торгового центра. Разработка системы с учетом реальных условий эксплуатации и пиковых нагрузок минимизирует риски отключений и сбоев в работе систем, что особенно важно для объектов с высоким уровнем посещаемости и непрерывной торговой деятельностью.

Кроме того, метод коэффициента спроса способствует повышению энергоэффективности объекта. Оптимизация мощности с учетом реального спроса позволяет более эффективно использовать энергетические ресурсы, снижая общее энергопотребление и, как следствие, эксплуатационные расходы.

Таким образом, метод коэффициента спроса в расчете нагрузки торгового центра обеспечивает точность в проектировании систем электроснабжения, повышает их надежность и способствует улучшению энергоэффективности, делая его незаменимым инструментом в современной энергетической инженерии.

«Активная силовая расчётная нагрузка потребителей рассматриваемого торгового центра» [7]:

$$P_p = P_{ном} \cdot k_c, кВт, \quad (1)$$

где « $k_c$  – коэффициент спроса потребителя» [7].

«Реактивная силовая расчётная нагрузка потребителей торгового центра» [7]:

$$Q_p = P_p \cdot tg\varphi, квар, \quad (2)$$

где « $tg \varphi$  – коэффициент реактивной мощности, соответствующий значению  $cos \varphi$ » [7].

«Определяется полная силовая расчётная нагрузка потребителей торгового центра» [7]:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}, \text{кВА.} \quad (3)$$

«Расчетный ток потребителей торгового центра» [7]:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}, \text{А.} \quad (4)$$

«В работе рассматривается расчет силовых электрических нагрузок на примере потребителя №1 по плану.

Активная и реактивная нагрузки» [7]:

$$P_p = 3,0 \cdot 1 = 3,0 \text{ кВт},$$

$$Q_p = 3,0 \cdot 0,33 = 0,99 \approx 1 \text{ квар.}$$

«Определяется полная расчётная нагрузка» [7]:

$$S_p = \sqrt{3^2 + 1^2} = 3,2 \text{ кВА.}$$

«Расчетный ток» [7]:

$$I_p = \frac{3,2}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 4,9 \text{ А.}$$

«Аналогично рассчитаны нагрузки для других потребителей реконструируемой сети торгового центра» [7].

Результаты расчётов представлены в форме таблицы 2.

Таблица 2 – Результаты расчёта электрических нагрузок потребителей торгового центра

Позиция	$P_p$ , кВт	$Q_p$ , квар	$S_p$ , кВА	$I_p$ , А
1	3,0	1,0	3,2	4,9
2	2,2	0,7	2,3	3,6
3	3,0	1,0	3,2	4,9
4	4,4	1,5	4,6	7,1
4.1	11,0	3,6	11,6	17,8
5	7,5	2,5	7,9	12,2
6	4,0	1,3	4,2	6,5
7	30,0	9,9	31,6	48,6
8 (8.1 – 8.2)	1,1	0,4	1,2	1,8
9 (9.1 – 9.3)	3,0	1,0	3,2	4,9
10 (10.1 – 10.4)	3,0	1,0	3,2	4,9
11	3,0	1,0	3,2	4,9
12	3,0	1,0	3,2	4,9
13	1,5	0,5	1,6	2,4
14	1,5	0,5	1,6	2,4
15(15.1 – 15.2)	1,5	0,5	1,6	2,4
16	22,0	7,3	23,2	35,6
17(17.1 – 17.2)	5,5	1,8	5,8	8,9
18(18.1 – 18.2)	2,2	0,7	2,3	3,6
19(19.1 – 19.2)	2,2	0,7	2,3	3,6
20	4,5	1,5	4,7	7,3
21	4,5	1,5	4,7	7,3
22	2,2	0,7	2,3	3,6
23	2,2	0,7	2,3	3,6
24(24.1 – 24.2)	3,7	1,2	3,9	6,0
25(25.1 – 25.2)	4,5	1,5	4,7	7,3
26(26.1 – 26.2)	4,5	1,5	4,7	7,3
27	22,0	7,3	23,2	35,6

Таким образом, необходимо рассчитать значение нагрузок, с учётом принятой схемы питания СРШ, ЩРО и ЩАО от двух источников, которыми являются силовые трансформаторы ТП-10/0,4 кВ.

«Также в работе проведены расчёты нагрузки секций шин ВРУ-0,4 кВ с учётом принятой схемы электроснабжения» [9].

«Результаты расчёта электрических нагрузок СРШ, щитков освещения ЩРО и ЩАО, а также всего рассматриваемого торгового центра» [7], представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчёта электрических нагрузок СРШ торгового центра

Позиция	$P_p$ , кВт	$Q_p$ , квар	$S_p$ , кВА	$I_p$ , А
<b>СРШ1</b>				
4	4,4	1,5	4,6	7,1
5	7,5	2,5	7,9	12,2
6	4,0	1,3	4,2	6,5
7	30,0	9,9	31,6	48,6
8.1	1,1	0,4	1,2	1,8
8.2	1,1	0,4	1,2	1,8
11	3,0	1,0	3,2	4,9
20	4,5	1,5	4,7	7,3
21	4,5	1,5	4,7	7,3
22	2,2	0,7	2,3	3,6
Всего по СРШ1 (с $K_o=0,9$ )	56,1	18,6	59,1	90,9
<b>СРШ2</b>				
15.1	1,5	0,5	1,6	2,4
15.2	1,5	0,5	1,6	2,4
16	22,0	7,3	23,2	35,6
17.1	5,5	1,8	5,8	8,9
17.2	5,5	1,8	5,8	8,9
18.1	2,2	0,7	2,3	3,6
18.2	2,2	0,7	2,3	3,6
19.1	2,2	0,7	2,3	3,6
19.2	2,2	0,7	2,3	3,6
Всего по СРШ2 ( $K_o=0,9$ )	40,3	13,2	42,4	65,2
<b>СРШ3</b>				
24.1	3,7	1,2	3,9	6,0
24.2	3,7	1,2	3,9	6,0
25.1	4,5	1,5	4,7	7,3
25.2	4,5	1,5	4,7	7,3
26.1	4,5	1,5	4,7	7,3
26.2	4,5	1,5	4,7	7,3
27	22,0	7,3	23,2	35,6
Всего по СРШ3 ( $K_o=0,9$ )	42,7	14,1	45,0	69,2
<b>СРШ4</b>				
9.1	3,0	1,0	3,2	4,9
9.2	3,0	1,0	3,2	4,9
9.3	3,0	1,0	3,2	4,9
10.1	3,0	1,0	3,2	4,9
10.2	3,0	1,0	3,2	4,9
10.3	3,0	1,0	3,2	4,9
10.4	3,0	1,0	3,2	4,9
12	3,0	1,0	3,2	4,9
Всего по СРШ4 ( $K_o=0,9$ )	21,6	7,2	22,8	35,0
<b>СРШ5</b>				
1	3,0	1,0	3,2	4,9
2	2,2	0,7	2,3	3,6
3	3,0	1,0	3,2	4,9

### Продолжение таблицы 3

Позиция	$P_p$ , кВт	$Q_p$ , квар	$S_p$ , кВА	$I_p$ , А
4.1	11,0	3,6	11,6	17,8
13	1,5	0,5	1,6	2,4
14	1,5	0,5	1,6	2,4
23	2,2	0,7	2,3	3,6
Всего по СРШ5 ( $K_o=0,9$ )	22,0	7,4	23,2	35,7
ЩРО	8,6	2,8	9,1	13,9
ЩАО	0,9	0,3	0,9	1,4
Всего по 1 СШ ВРУ	101,0	33,2	106,3	163,6
Всего по 2 СШ ВРУ	91,2	30,4	96,1	147,9
Всего по СЭС ТЦ	192,2	63,6	202,5	311,5

«Результаты, полученные при расчёте электрических нагрузок, используются в работе далее при выборе оборудования СЭС ТЦ» [10].

### **2.3 Выбор и расчёт числа и мощности трансформаторов подстанций**

Выбор и проверка силовых трансформаторов для установки на питающей трансформаторной подстанции ТП-10/0,4 кВ торгового центра представляют собой важную задачу, которая требует тщательного подхода и строгого соответствия техническим стандартам.

Данный выбор и проверки направлены на обеспечение надежного, безопасного и эффективного функционирования электроснабжения объекта.

При выборе силовых трансформаторов основное внимание уделяется их мощностным характеристикам и способности выдерживать максимальные продолжительные нагрузки, возникающие в процессе эксплуатации торгового центра.

Ключевыми параметрами являются номинальная мощность, максимальная эффективность и соответствие требованиям по энергоэффективности.

Трансформатор должен быть способен обеспечивать стабильное напряжение при переменных нагрузках, что важно для поддержания

функциональности всех систем торгового центра, включая освещение, отопление, вентиляцию и кондиционирование.

Дополнительно осуществляется проверка способности трансформатора справляться с кратковременными перегрузками, которые могут возникать в условиях интенсивной эксплуатации торгового центра (проверка на допустимые перегрузки).

Это критически важно для предотвращения аварийных ситуаций, которые могут привести к значительным финансовым потерям и нарушению работы торгового центра.

Таким образом, правильный выбор и всесторонняя проверка силовых трансформаторов для ТП-10/0,4 кВ являются неотъемлемой частью обеспечения надежности и эффективности электроснабжения торгового центра, что способствует созданию безопасной и комфортной среды для посетителей и персонала.

«Как было указано ранее, на питающей подстанции переменного напряжения торгового центра ТП-10/0,4 кВ, изначально были установлены два силовых трансформатора ТМ-250/10.

Проводится проверка мощности этих трансформаторов на соответствие потребляемой нагрузке, с учётом подключения нагрузки потребителей системы электроснабжения торгового центра.

Так как понизительные трансформаторы торгового центра питают также другие потребители, большинство из которых относится ко II категории надёжности, следовательно, на данной понизительной подстанции устанавливаются два силовых трансформатора» [4].

«При выборе трансформаторов на питающей подстанции необходимо также учесть нагрузку сторонних потребителей, которых питает эта ТП-10/0,4 кВ.

Как известно, номинальная мощность силового трансформатора для его установки на подстанции переменного напряжения торгового центра,

определяется с учётом возможного и перспективного питания сторонней нагрузки [13]:

$$S_{\text{ном.т}} \geq S_{\text{ном.т.р}} = \frac{P_{\text{р.}} + P_{\text{см.}}}{N\beta_{\text{т}}}, \quad (5)$$

где  $S_{\text{ном.т.}}$  – «номинальная (паспортная) мощность силового трансформатора подстанции переменного напряжения ТП-10/0,4 кВ, питающей потребителя торгового центра;

$S_{\text{ном.т.р}}$  – расчетная мощность трансформатора, установленного на подстанции переменного напряжения ТП-10/0,4 кВ, питающей потребителя торгового центра;

$P_{\text{р.}}$  – суммарная активная нагрузка потребителей, которые получают питание от подстанции переменного напряжения торгового центра;

$P_{\text{см.}}$  – суммарная активная нагрузка сторонних потребителей, которые получают питание от подстанции переменного напряжения ТП-10/0,4 кВ, питающей потребителя торгового центра;

$N$  – количество силовых трансформаторов для установки на ТП-10/0,4 кВ кВ, питающей потребителя торгового центра, шт;

$\beta_{\text{т}}$  – нормируемый коэффициент загрузки силового трансформатора на ТП-10/0,4 кВ кВ, питающей потребителя торгового центра» [4].

$$S_{\text{ном.т}} \geq S_{\text{ном.т.р}} = \frac{192,2 + 120}{2 \cdot 0,8} = 195,1 \text{ кВА.}$$

«Дополнительно необходимо провести проверку выбранных силовых трансформаторов на перегрузочную способность как в нормальном, так и в максимальном режиме работы, которая выполняется в работе далее после выбора компенсирующих устройств на ТП-10/0,4 кВ» [16].

## 2.4 Выбор компенсирующих устройств

Выбор устройств для компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения торгового центра, осуществляемый на уровне питающей ТП-10/0,4 кВ, является важным аспектом проектирования и реконструкции электрических сетей. Эта мера направлена на оптимизацию потребления электроэнергии, повышение эффективности энергосистемы и снижение финансовых затрат за счет уменьшения платы за использование электросетей.

Компенсация реактивной мощности заключается в управлении и балансировке энергии, потребляемой электрическими устройствами, которые создают реактивную нагрузку. Эти устройства включают в себя большое количество светильников, холодильного оборудования, лифтов, эскалаторов и систем кондиционирования, характерных для торговых центров. Несбалансированная реактивная мощность может привести к потерям энергии в сети, ухудшению качества электроэнергии и повышению нагрузки на оборудование.

Для компенсации реактивной мощности применяются конденсаторные батареи и синхронные компенсаторы. Конденсаторные батареи наиболее распространены благодаря своей стоимостной доступности и эффективности в нормализации коэффициента мощности, уменьшении потерь в распределительных сетях и предотвращении штрафов от энергоснабжающих компаний. Синхронные компенсаторы, хотя и более дорогие, обеспечивают дополнительные преимущества в регулировании напряжения и управлении динамическими нагрузками, что может быть критически важно для крупных торговых комплексов с переменными и пиковыми нагрузками.

В сети СЭС ТЦ применяются только конденсаторные установки (КУ).

Процесс выбора устройств для компенсации реактивной мощности включает анализ текущего потребления электроэнергии, оценку максимальных и минимальных нагрузок и прогнозируемых изменений в

потреблении. Это позволяет точно определить необходимую мощность устройств компенсации и их оптимальное размещение в сети, чтобы максимизировать эффективность и экономическую выгоду от их использования.

Таким образом, внедрение систем компенсации реактивной мощности в электросети торгового центра способствует созданию более стабильной, надежной и экономичной системы электроснабжения, что важно для обеспечения бесперебойной работы всех систем здания и комфорта посетителей и персонала.

«Реактивная мощность, которую способен пропустить через себя силовой трансформатор на питающей ТП-10/0,4 кВ торгового центра с учётом нагрузки сторонних потребителей» [18]:

$$Q_T = \sqrt{(N\beta_T S_{\text{ном.Т}})^2 - (P_p + P_{\text{ст.}})^2}. \quad (6)$$

«Расчётная мощность конденсаторных установок (КУ) на питающей ТП-10/0,4 кВ торгового центра определяется так» [10]:

$$Q_{\text{н.к}} = (Q_p + Q_{\text{ст.}}) - Q_T, \quad (7)$$

где « $Q_p$  – реактивная нагрузка торгового центра, квар;

$Q_{\text{ст}}$  – реактивная нагрузка сторонних потребителей, квар» [10].

«Суммарная расчетная мощность КУ» [10]:

$$Q_{\text{КУ}} = n \cdot Q_{\text{н.к.}}. \quad (8)$$

«С учётом установки компенсирующих устройств на питающей ТП-10/0,4 кВ торгового центра» [13]:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + (Q_p - Q_{КУ})^2}. \quad (9)$$

«Проверка выбранных трансформаторов в нормальном режиме с учётом выбранных КУ по допустимому коэффициенту загрузки» [12]:

$$K_3^n = \frac{0,5 \cdot S_p}{S_{ном.т}} \leq 0,85. \quad (10)$$

«Проверка выбранных ранее трансформаторов по допустимому коэффициенту загрузки в послеаварийном режиме, с учётом выбранных типов и мощности КУ на питающей ТП-10/0,4» [12]:

$$K_3^{n.ав} = \frac{S_p}{S_{ном.т}} \leq 1,7. \quad (11)$$

Согласно (6):

$$Q_T = \sqrt{(2 \cdot 0,8 \cdot 250)^2 - (192,2 + 120)^2} = 250,1 \text{ квар.}$$

Согласно (7):

$$Q_{н.к} = (63,6 + 39,6) - 250,1 = -146,9 \text{ квар.}$$

«Так как в результате расчётов получилось отрицательное расчётное значение мощности КУ, следовательно, КУ 0,4 кВ на ТП-10/0,4 кВ СЭС ТЦ не устанавливаются» [10].

«Исходя из этого, расчётная нагрузка питающей ТП-10/0,4 кВ торгового центра с учётом компенсации РМ» [15]:

$$S_p = \sqrt{(P_p + P_{ст.})^2 - (Q_p + Q_{ст.})^2}, \text{ кВА.} \quad (12)$$

$$S_p = \sqrt{(192,2 + 120)^2 - (63,6 + 39,6)^2} = 328,8 \text{ кВА.}$$

«Проверка выбранных трансформаторов питающей ТП-10/0,4 кВ торгового центра в нормальном режиме» [12]:

$$K_3^H = \frac{0,5 \cdot S_p}{S_{ном.т}} \leq 0,8. \quad (13)$$

«Проверка выбранных ранее трансформаторов питающей ТП-10/0,4 кВ торгового центра с учётом сторонних потребителей в ПАВ режиме» [12]:

$$K_3^{n.ав} = \frac{S_p}{S_{ном.т}} \leq 1,7. \quad (14)$$

«Проверка трансформаторов питающей ТП-10/0,4 кВ в нормальном режиме выполняется» [12]:

$$K_3^H = \frac{0,5 \cdot 328,8}{250} = 0,66 \leq 0,8.$$

«Проверка трансформаторов ТП-10/0,4 кВ в ПАВ режиме выполняется» [12]:

$$K_3^{n.ав} = \frac{328,8}{250} = 1,3 \leq 1,6.$$

Окончательно принимается на ТП-10/0,4 кВ СЭС ТЦ, два силовых трансформатора марки ТМ-250/10. При этом на ТП КУ не устанавливаются.

## 2.5 Расчёт токов короткого замыкания

«Далее в работе осуществляется расчёт токов короткого замыкания (далее – КЗ) в системе электроснабжения СЭС ТЦ» [13].

Расчёт токов короткого замыкания в системе электроснабжения торгового центра является критически важной процедурой, обеспечивающей безопасность, надёжность и стабильность электрической сети. Этот процесс включает анализ потенциальных точек возникновения короткого замыкания и определение максимальных токов, которые могут протекать через электрическую систему в аварийных режимах. Подобные расчёты помогают проверить и выбрать проводники и аппараты, а также рассчитать уставки релейной защиты и автоматики, способных быстро реагировать на аварийные токи КЗ.

Ключевым моментом в анализе является определение максимально возможных токов короткого замыкания на основе существующих конфигураций электрической сети и характеристик установленного оборудования. Эти токи зависят от множества факторов, включая импеданс источника питания, параметры трансформаторов, конфигурацию и типы проводников, а также от расстояния от источника питания до точки короткого замыкания.

Кроме того, точные расчёты токов короткого замыкания важны для соблюдения норм и стандартов электробезопасности, установленных в нормативных документах. Данные аспекты обеспечивают защиту СЭС торговых центров, а также помогает избежать человеческих и экономических потерь от возможных аварий.

Таким образом, расчёт токов короткого замыкания играет центральную роль в проектировании и эксплуатации электроснабжения торговых центров, представляя собой неотъемлемую часть общей стратегии обеспечения электрической безопасности и надёжности. «Однолинейная упрощённая расчётная схема сети системы электроснабжения торгового центра,

необходимая для расчёта токов КЗ в максимальном режиме» [12] представлена в работе на рисунке 5.

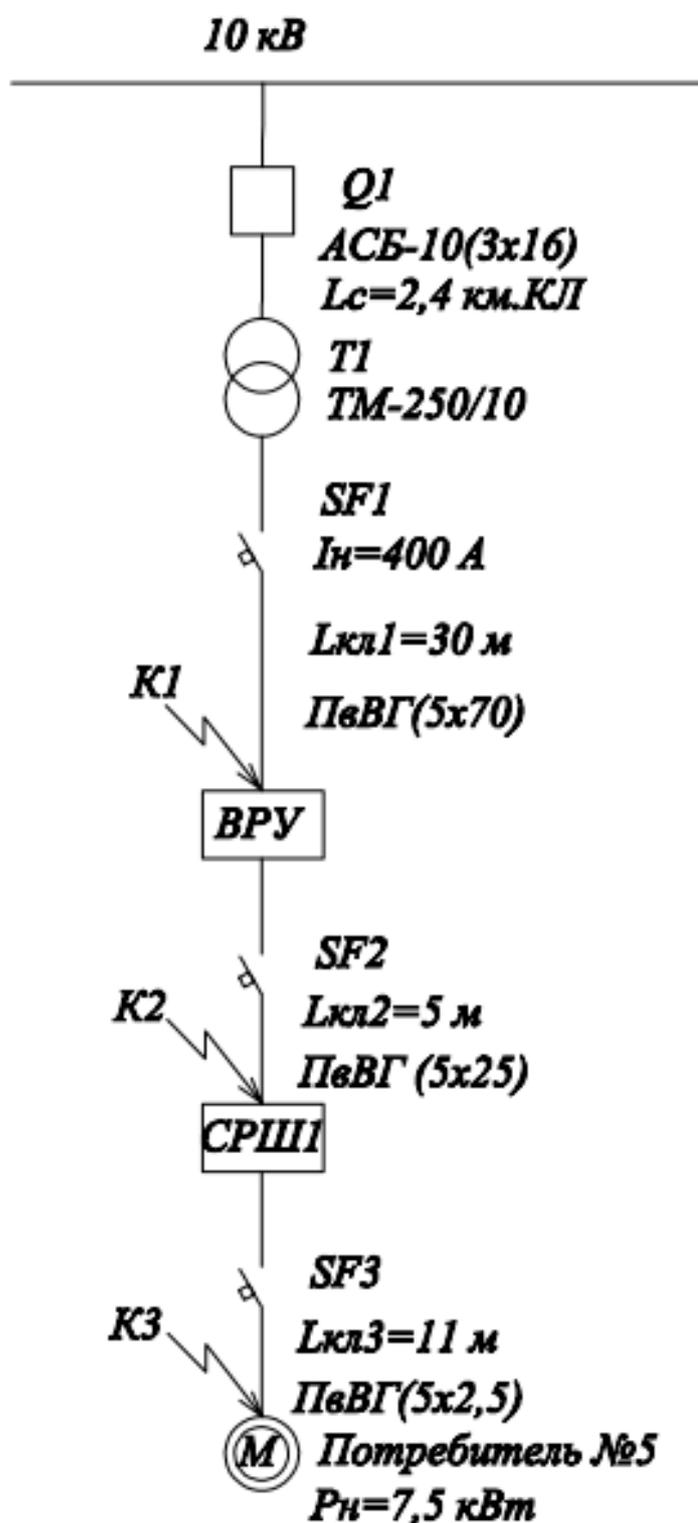


Рисунок 5 – «Однолинейная упрощённая расчётная схема сети для расчёта токов КЗ в максимальном режиме в системе электроснабжения торгового центра» [12]

«Базисная мощность» [12]:

$$S_{\bar{o}} = 250 \text{ кВА} = 0,25 \text{ МВА}.$$

«Базисное напряжение» [12]:

$$U_{\bar{o}.} = 1,05 \cdot U_{\text{ном}}, \text{кВ}, \quad (15)$$

$$U_{\bar{o}.1} = 1,05 \cdot 10 = 10,5 \text{ кВ},$$

$$U_{\bar{o}.2} = 1,05 \cdot 0,38 = 0,4 \text{ кВ}.$$

«Базисный ток» [12]:

$$I_{\bar{o}} = \frac{S_{\bar{o}}}{\sqrt{3}U_{\bar{o}}}, \quad (16)$$

$$I_{\bar{o}.1} = \frac{0,25}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 0,01 \text{ кА},$$

$$I_{\bar{o}.2} = \frac{0,25}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 0,38 \text{ кА}.$$

«Исходя из расчётной схемы, составляется однолинейная упрощённая схема замещения сети для расчёта токов КЗ в максимальном режиме в системе электроснабжения торгового центра» [12].

Данная схема приведена на рисунке 6.

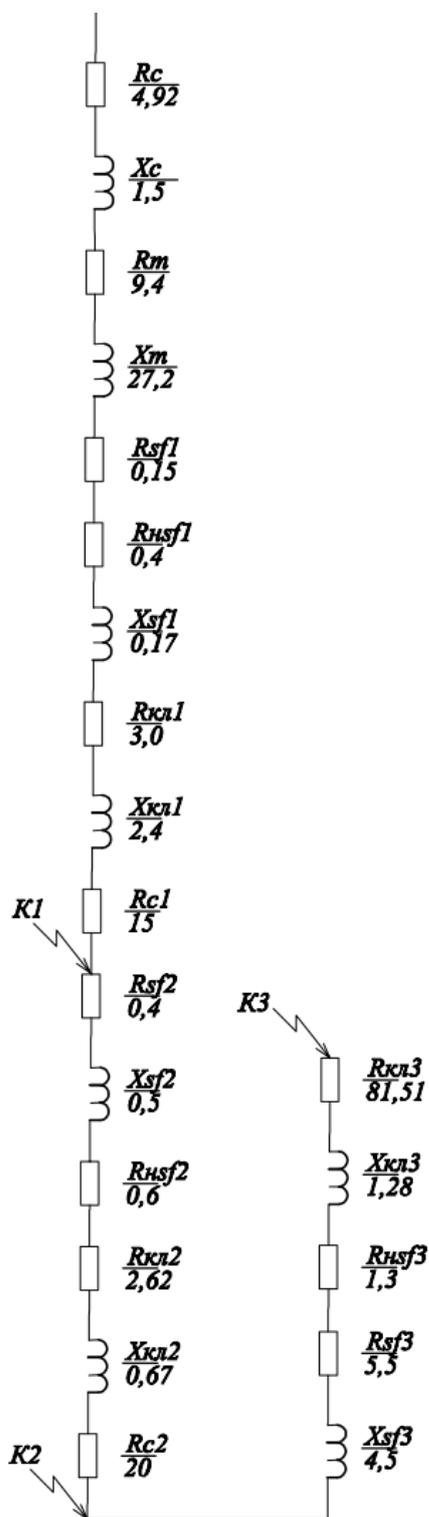


Рисунок 6 – «Однолинейная упрощённая схема замещения сети для расчёта токов КЗ в максимальном режиме в системе электроснабжения торгового центра» [12]

«Вычисляются сопротивления элементов и наносятся на схему замещения» [5].

$$I_c = \frac{S_m}{\sqrt{3} \cdot U_c}, A, \quad (17)$$

$$I_c = \frac{250}{\sqrt{3} \cdot 10} = 14,4 A.$$

«Удельное индуктивное сопротивление КЛ АСБ-10(3×16):  $x_0=0,4$  Ом/км;  $r_0=1,28$  Ом/км» [8].

$$X'_c = x_0 L_c, Ом, \quad (18)$$

$$R'_c = r_0 L_c, Ом, \quad (19)$$

$$X'_c = 0,4 \cdot 2,4 = 0,96 Ом,$$

$$R'_c = 1,28 \cdot 2,4 = 3,07 Ом.$$

«Сопротивления приводятся к базисным условиям 0,4 кВ» [5]:

$$R_c = R'_c \left( \frac{U_{нн}}{U_{вн}} \right)^2, мОм, \quad (20)$$

$$X_c = X'_c \left( \frac{U_{нн}}{U_{вн}} \right)^2, мОм, \quad (21)$$

$$R_c = 3,072 \cdot (0,4 / 10)^2 \cdot 10^3 = 4,92 мОм,$$

$$X_c = 0,96 \cdot (0,4 / 10)^2 \cdot 10^3 = 1,5 мОм.$$

«Для кабелей схемы» [5]

$$R_{кл1} = r_{01} \cdot L_{кл1}, мОм, \quad (22)$$

где « $R_{кл1}$  – активное сопротивление КЛ» [5].

$$X_{кл1} = x_{01} \cdot L_{кл1}, мОм, \quad (23)$$

где « $X_{кл1}$  – индуктивное сопротивление КЛ» [5].

Соответственно, для питающей сети 10 и 0,4 кВ:

$$R_{кл1} = 0,1 \cdot 30 = 3,0 \text{ мОм},$$

$$X_{кл1} = 0,08 \cdot 30 = 2,4 \text{ мОм},$$

$$R_{кл2} = 0,524 \cdot 5 = 2,62 \text{ мОм},$$

$$X_{кл2} = 0,133 \cdot 5 = 0,67 \text{ мОм}.$$

«Для распределительной КЛ-0,4 кВ» [12]:

$$R_{кл3} = 7,41 \cdot 11 = 81,51 \text{ мОм},$$

$$X_{кл3} = 0,116 \cdot 11 = 1,28 \text{ мОм}.$$

«Упрощённая преобразованная схема замещения для расчёта токов КЗ в системе электроснабжения торгового центра» [12], приведена на рисунке 7.

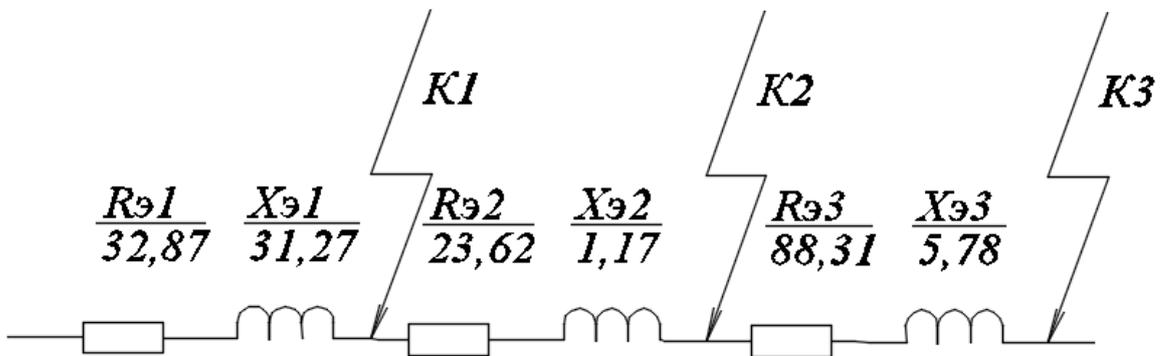


Рисунок 7 – «Упрощённая преобразованная схема замещения для расчёта токов КЗ в системе электроснабжения торгового центра» [12]

«Далее выполняется последовательное преобразование упрощённой преобразованной схемы замещения для расчёта токов КЗ в системе электроснабжения торгового центра, относительно расчётных точек КЗ, с последующим расчётом эквивалентных сопротивлений в каждой расчётной точке» [8]:

$$R_{\vartheta 1} = R_c + R_m + R_{SF1} + R_{H_{SF1}} + R_{c1} + R_{\kappa 1}, \text{ мОм}, \quad (24)$$

$$R_{\vartheta 1} = 4,92 + 9,4 + 0,15 + 0,4 + 15 + 3 = 32,87 \text{ мОм},$$

$$X_{\vartheta 1} = X_c + X_m + X_{SF1} + X_{\kappa 1}, \text{ мОм}, \quad (25)$$

$$X_{\vartheta 1} = 1,5 + 27,2 + 0,17 + 2,4 = 31,27 \text{ мОм},$$

$$R_{\vartheta 2} = R_{SF2} + R_{H_{SF2}} + R_{\kappa 2} + R_{c2}, \text{ мОм}, \quad (26)$$

$$R_{\vartheta 2} = 0,4 + 0,6 + 2,62 + 20 = 23,62 \text{ мОм},$$

$$X_{\vartheta 2} = X_{SF2} + X_{\kappa 2}, \text{ мОм}, \quad (27)$$

$$X_{\vartheta 2} = 0,5 + 0,67 = 1,17 \text{ мОм},$$

$$R_{\vartheta 3} = R_{SF3} + R_{H_{SF3}} + R_{\kappa 3}, \text{ мОм}, \quad (28)$$

$$R_{\vartheta 3} = 5,5 + 1,3 + 81,51 = 88,31 \text{ мОм},$$

$$X_{\vartheta 3} = X_{SF3} + X_{\kappa 3}, \text{ мОм}. \quad (29)$$

$$X_{\vartheta 3} = 4,5 + 1,28 = 5,78 \text{ мОм}.$$

«Проводится расчёт эквивалентных сопротивлений к точкам КЗ» [5]:

$$R_{\kappa 1} = R_{\vartheta 1}, \text{ мОм}, \quad (30)$$

$$R_{\kappa 1} = 32,87 \text{ мОм},$$

$$X_{\kappa 1} = X_{\vartheta 1}, \text{ мОм}, \quad (31)$$

$$X_{\kappa 1} = 31,27 \text{ мОм},$$

$$Z_{\kappa 1} = \sqrt{R_{\kappa 1}^2 + X_{\kappa 1}^2}, \text{ мОм}, \quad (32)$$

$$Z_{\kappa 1} = \sqrt{32,87^2 + 31,27^2} = 45,37 \text{ мОм},$$

$$R_{\kappa 2} = R_{\vartheta 1} + R_{\vartheta 2}, \text{ мОм}, \quad (33)$$

$$R_{\kappa 2} = 32,87 + 23,62 = 56,48 \text{ мОм},$$

$$X_{\kappa 2} = X_{\vartheta 1} + X_{\vartheta 2}, \text{ мОм}, \quad (34)$$

$$X_{\kappa 2} = 31,27 + 1,17 = 32,44 \text{ мОм},$$

$$Z_{\kappa 2} = \sqrt{R_{\kappa 2}^2 + X_{\kappa 2}^2}, \text{ мОм}, \quad (35)$$

$$Z_{\kappa 2} = \sqrt{56,48^2 + 32,44^2} = 65,13 \text{ мОм},$$

$$R_{\kappa 3} = R_{\kappa 2} + R_{\kappa 3}, \text{ мОм}, \quad (36)$$

$$R_{\kappa 3} = 56,48 + 88,31 = 144,79 \text{ мОм},$$

$$X_{\kappa 3} = X_{\kappa 2} + X_{\kappa 3}, \text{ мОм}, \quad (37)$$

$$X_{\kappa 3} = 32,44 + 5,78 = 38,22 \text{ мОм},$$

$$Z_{\kappa 3} = \sqrt{R_{\kappa 3}^2 + X_{\kappa 3}^2}, \text{ мОм}, \quad (38)$$

$$Z_{\kappa 2} = \sqrt{144,79^2 + 38,22^2} = 149,75 \text{ мОм}.$$

«Искомые значение токов трёхфазного КЗ в расчётных точках схемы рассчитываются так» [5]:

$$I_{\kappa 1}^{(3)} = \frac{U_{\kappa}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\kappa}}, \text{ кА}, \quad (39)$$

$$I_{\kappa 1}^{(3)} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 45,37} \cdot 10^3 = 5,09 \text{ кА},$$

$$I_{\kappa 2}^{(3)} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 65,13} \cdot 10^3 = 3,37 \text{ кА},$$

$$I_{\kappa 3}^{(3)} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 149,75} \cdot 10^3 = 0,85 \text{ кА}.$$

«Значение ударных токов» [18]:

$$i_{\text{ук}} = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I_{\kappa}^{(3)}, \text{ кА}, \quad (40)$$

где « $K_y$  - ударный коэффициент» [18].

$$i_{\text{ук}1} = \sqrt{2} \cdot 1 \cdot 5,09 = 7,18 \text{ кА}.$$

$$i_{\text{ук}2} = \sqrt{2} \cdot 1 \cdot 3,37 = 4,75 \text{ кА}.$$

$$i_{\text{ук}3} = \sqrt{2} \cdot 1 \cdot 0,85 = 1,2 \text{ кА}.$$

«Результаты расчёта токов КЗ в расчётных точках схемы приведены в таблице 4» [5].

Таблица 4 – Результаты расчёта токов КЗ

Точка КЗ	$R_k$ , мОм	$X_k$ , мОм	$Z_k$ , мОм	$I_k^{(3)}$ , кА	$i_y$ , кА
К1	32,87	31,27	45,37	5,09	7,18
К2	56,48	32,44	65,13	3,37	4,75
К3	144,79	38,22	149,75	0,85	1,20

«Полученные результаты расчётов токов трёхфазного короткого замыкания, а также величины ударных токов, используются в работе далее при выборе оборудования СЭС ТЦ» [6].

## 2.6 Выбор и расчёт проводников

«Необходимо «выбрать сечения следующих кабельных линий, с последующими необходимыми проверками:

- питающая кабельная линия напряжением 10 кВ (два силовых кабеля для питания трансформаторов ТП-10/0,4 кВ от РП 10 кВ по радиальной схеме с резервированием);
- питающие кабельные линии напряжением 0,38/0,22 кВ для питания ВРУ-0,4 кВ системы электроснабжения торгового центра от шин РУ-0,4 кВ ТП-10/0,4 кВ (силовые кабели по радиальной схеме с резервированием на шинах РУ-0,4 кВ);
- распределительные кабельные линии напряжением 0,38/0,22 кВ для питания СРШ от ВРУ-0,4 кВ, а также потребителей системы электроснабжения торгового центра от шин СРШ (силовые кабели по радиальной схеме с резервированием на шинах 0,4 кВ СРШ)» [9].

«Рабочий ток» [7]:

$$I_{p.} = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{ном.}} \quad (41)$$

«Максимальный расчётный ток» [11]:

$$I_{p.max} = 1,4 I_{p.} \quad (42)$$

«Условие проверки» [11]:

$$I_{дон} \geq I_{p.max}, \quad (43)$$

где « $I_{дон}$  – длительно – допустимый ток, А;

$I_{p.max}$  – максимальный ток участка, А» [1].

«Кабели 10 кВ выбираются по экономической плотности тока» [1]:

$$F_3 = \frac{I_{p.}}{j_3} \quad (44)$$

«Расчётный ток нормального режима на стороне 10 кВ подстанции» [9]:

$$I_{p.} = \frac{250}{\sqrt{3} \cdot 10} = 14,5 \text{ А.}$$

«Сечение кабельной линии 10 кВ» [9]:

$$F_3 = \frac{14,5}{1,6} = 9 \text{ мм}^2.$$

«Принимается кабель АСБ-10 (3×16) с предельно-допустимым током  $I_{\text{дон}}=75 \text{ A}$ » [1]. Максимальный расчётный ток этой линии:

$$I_{p.\text{max}} = 1,4 \cdot 36,4 \approx 51 \text{ A.}$$

«Условия проверки питающей кабельной линии 10 кВ по условию допустимого нагрева в послеаварийном режиме, выполняется» [9]:

$$75 \text{ A} \geq 20,3 \text{ A.}$$

«Величина потери напряжения в кабельных линиях» [4]

$$\Delta U = \frac{S_p \cdot l \cdot (r_0 \cdot \cos \varphi + x_0 \cdot \sin \varphi)}{U_n^2} \cdot 100 \% \leq 5 \%, \quad (45)$$

где « $S_p$  – значение расчётной полной нагрузки питающей ТП-10/0,4 кВ, кВА;

$l$  – длина трассы кабельной линии, км» [4].

«Проверка выбранного сечения кабельной линии 10 кВ для питания ТП-10/0,4 кВ, на допустимую потерю напряжения в нормальном режиме» [4]:

$$\Delta U_n = \frac{\sqrt{3} \cdot 328,8 \cdot 0,5 \cdot (1,17 \cdot \cos 0,95 + 0,066 \cdot \sin 0,95)}{6000} \cdot 100\% = 1,12\%.$$

«Условие проверки выполняется» [4]:

$$1,12\% \leq 5\%.$$

«Аналогично проводятся расчёты для остальных кабельных линий питающей сети торгового центра и результаты приводятся в таблице 5» [19].

Таблица 5 – Результаты выбора кабельных линий питающей сети 0,38/0,22 кВ СЭС ТЦ

Наименование	$I_p,$ А	$I_{p,max},$ А	Марка кабеля	$I'_{доп},$ А
Питающая сеть «ТП-10/0,4 кВ – ВРУ»				
СШ1 ВРУ	163,6	229,1	ПвВГ (5×70)	235
СШ2 ВРУ	147,9	207,1	ПвВГ (5×70)	235
Питающая сеть «ВРУ – СРШ (ЩРО, ЩАО)»				
СРШ1	90,9	127,3	ПвВГ (5×25)	133
СРШ2	65,2	91,3	ПвВГ (5×16)	104
СРШ3	69,2	96,9	ПвВГ (5×16)	104
СРШ4	35,0	49,0	ПвВГ (5×6)	59
СРШ5	35,7	50,0	ПвВГ (5×6)	59
ЩРО	13,9	19,5	ПвВГ (5×2,5)	37
ЩАО	1,4	2,0	ПвВГ (5×2,5)	37

«Для кабелей распределительной сети до 1 кВ (0,38/0,22 кВ) СЭС ТЦ выбираются силовые кабели марки ПвВГ» [12]. Эти кабели разработаны с учетом строгих требований к огнестойкости, что позволяет им сохранять функциональность даже при прямом воздействии огня в течение определенного времени, что критически важно для обеспечения безопасной эвакуации людей и функционирования систем пожаротушения и аварийного освещения в условиях возгорания.

Силовые кабели марки ПвВГ характеризуются использованием специальных огнестойких материалов в изоляции и оболочке, которые не поддерживают горение и могут противостоять высоким температурам без потери своих электрических свойств.

Применение кабелей ПвВГ значительно повышает уровень пожарной безопасности электрических систем, что делает их идеальным выбором для использования в местах с высокими требованиями к пожарной безопасности, таких как больницы, школы, торговые центры и другие общественные здания. Кроме того, эти кабели позволяют существенно снизить риски возникновения пожара из-за короткого замыкания благодаря своим высоким изоляционным свойствам. Результаты выбора кабелей распределительной сети 0,38/0,22 кВ СЭС ТЦ с применением кабелей марки ПвВГ представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты выбора кабелей распределительной сети 0,38/0,22 кВ

Номер потребителя	$I_p, A$	$I_{p,max}, A$	Марка кабеля	$I'_{доп}, A$
<b>Потребители СРШ1</b>				
4	7,1	9,9	ПвВГ (5×2,5)	37
5	12,2	17,1	ПвВГ (5×2,5)	37
6	6,5	9,1	ПвВГ (5×2,5)	37
7	48,6	68,1	ПвВГ (5×10)	79
8.1	1,8	2,5	ПвВГ (5×2,5)	37
8.2	1,8	2,5	ПвВГ (5×2,5)	37
11	4,9	6,9	ПвВГ (5×2,5)	37
20	7,3	10,2	ПвВГ (5×2,5)	37
21	7,3	10,2	ПвВГ (5×2,5)	37
22	3,6	2,1	ПвВГ (5×2,5)	37
<b>Потребители СРШ2</b>				
15.1	2,4	3,4	ПвВГ (5×2,5)	37
15.2	2,4	3,4	ПвВГ (5×2,5)	37
16	35,6	49,7	ПвВГ (5×6)	59
17.1	8,9	12,5	ПвВГ (5×2,5)	37
17.2	8,9	12,5	ПвВГ (5×2,5)	37
18.1	3,6	2,1	ПвВГ (5×2,5)	37
18.2	3,6	2,1	ПвВГ (5×2,5)	37
19.1	3,6	2,1	ПвВГ (5×2,5)	37
19.2	3,6	2,1	ПвВГ (5×2,5)	37
<b>Потребители СРШ3</b>				
24.1	6,0	8,4	ПвВГ (5×2,5)	37
24.2	6,0	8,4	ПвВГ (5×2,5)	37
25.1	7,3	10,2	ПвВГ (5×2,5)	37
25.2	7,3	10,2	ПвВГ (5×2,5)	37
26.1	7,3	10,2	ПвВГ (5×2,5)	37
26.2	7,3	10,2	ПвВГ (5×2,5)	37
27	35,6	49,7	ПвВГ (5×6)	59
<b>Потребители СРШ4</b>				
9.1	4,9	6,9	ПвВГ (5×2,5)	37
9.2	4,9	6,9	ПвВГ (5×2,5)	37
9.3	4,9	6,9	ПвВГ (5×2,5)	37
10.1	4,9	6,9	ПвВГ (5×2,5)	37
10.2	4,9	6,9	ПвВГ (5×2,5)	37
10.3	4,9	6,9	ПвВГ (5×2,5)	37
10.4	4,9	6,9	ПвВГ (5×2,5)	37
12	4,9	6,9	ПвВГ (5×2,5)	37
<b>Потребители СРШ5</b>				
1	4,9	6,9	ПвВГ (5×2,5)	37
2	3,6	5,1	ПвВГ (5×2,5)	37
3	4,9	6,9	ПвВГ (5×2,5)	37
4.1	17,8	24,9	ПвВГ (5×2,5)	37
13	2,4	3,4	ПвВГ (5×2,5)	37
14	2,4	3,4	ПвВГ (5×2,5)	37
23	3,6	5,1	ПвВГ (5×2,5)	37

Все выбранные проводники могут быть применены в СЭС ТЦ.

## 2.7 Выбор основного оборудования и его проверка

Далее в работе, основываясь на расчётных данных, полученных в работе ранее, с учётом реконструированных схем, проводится выбор основного оборудования системы электроснабжения торгового центра и его проверка.

Основное оборудование включает выбор защитных и коммутационных «электрических аппаратов системы электроснабжения торгового центра» [2].

«Выбор аппаратов высокого напряжения в общем виде производится по номинальным значениям напряжения и тока по условиям» [12]:

$$U_{уст} \leq U_n, \quad (46)$$

$$I_{раб.макс.} \leq I_n. \quad (47)$$

«Для отключающих аппаратов проверка на ток отключения» [12]:

$$I_{н.т} \leq I_{отк.ном}. \quad (48)$$

«Проверка на отключение апериодической составляющей тока» [12]:

$$i_{а.т} \leq i_{а.ном} = \sqrt{2} \cdot \beta_{ном} \cdot I_{отк.ном}, \quad (49)$$

где « $\beta_{ном}$  – номинальное значение относительного содержания апериодической составляющей в отключаемом токе;  
 $i_{а.ном}$  – номинальное допустимое значение апериодической составляющей в отключаемом токе для времени» [12].

«Проверка аппаратов на электродинамическую стойкость [12]:

$$I'' \leq I_{отк.ном}, \quad (50)$$

$$i_y \leq i_{дин.}, \quad (51)$$

где « $i_{дин.}$  – номинальный ток электродинамической стойкости» [12].

«Проверка электрических аппаратов на термическую стойкость» [12]:

$$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T, \quad (52)$$

где « $I_T$  – предельный ток термической стойкости по каталогу» [12].

«Для примера проводится выбор и проверка выключателя для защиты и коммутации ТП-10/0,4 кВ на стороне 10 кВ, установленном на питающем РП 10 кВ энергосистемы» [19]:

$$U_{ном} = 10 \text{ кВ} = U_{сети} = 10 \text{ кВ},$$

$$I_{ном} = 630 \text{ А} > I_{расч} = 20,2 \text{ А},$$

$$I_{откл} = 20 \text{ кА} > I_{к1} = 6,0 \text{ кА},$$

$$i_{пр.скв} = 20 \text{ кА} > i_{ук1} = 15,27 \text{ кА}.$$

«Окончательно выбирается для установки на питающем РП-10 кВ для защиты и коммутации торгового центра, вакуумный выключатель номинального напряжения 10 кВ марки VD-4-10-20/630-У2-48 (производитель – фирма АВВ, Швеция)» [19].

«Аналогично осуществлены выбор и проверка электрических аппаратов 10 кВ (коммутационных, защитных и регулирующих) для их установки в РУ-10 кВ питающей ТП-10/0,4 кВ торгового центра, а также и на питающем РП 10 кВ» [19]

Полученные результаты представлены в форме таблицы 7.

Таблица 7 – «Результаты выбора электрических аппаратов напряжением 10 кВ» [19]

Наименование аппарата	Место установки оборудования	Марка (типономинал) аппарата
Выключатель	РП 10 кВ	VD-4-10-8/630 У2
Предохранитель плавкий	РУ-10 кВ ТП-10/0,4 кВ	ПК103-10-40-31,5/У3
Трансформатор тока	РП 10 кВ	ТПЛ-10
Трансформатор напряжения	РП 10 кВ	НАМИ-10
Ограничители перенапряжений	РП 10 кВ	ОПН-КР/TEL-10/12 УХЛ1
Выключатель нагрузки	РУ-10 кВ ТП-10/0,4 кВ	ВНР-10/400-10-У3

«Далее в работе проводится выбор и проверка аппаратов в сети 0,4 кВ торгового центра. В схеме электроснабжения торгового центра, автоматы устанавливаются в шкафах РУ-0,4 кВ на питающем ТП-10/0,4 кВ, а также в шкафах ВРУ-0,4 кВ для защиты СРШ, и в самих СРШ для защиты одиночных потребителей объекта. Автоматы в сети 0,4 кВ торгового центра, выбираются по условиям, приведённым ниже.

Номинальные токи автомата и уставки теплового расцепителя автомата» [15]:

$$I_{ном.а} \geq I_p. \quad (53)$$

$$I_{у.т.р} \geq 1,1 \cdot I_p. \quad (54)$$

«Ток электромагнитного расцепителя» [14]:

$$I_{ном.э.р} \geq K_{то} \cdot I_p \geq I_k. \quad (55)$$

«В случае, если автомат выполнен с регулируемым электромагнитным расцепителем, зависящим от тока уставки теплового расцепителя» [19]:

$$I_{у.э.р} \geq K \cdot I_{у.т.р}, \quad (56)$$

где « $K$  – кратность тока уставки ЭМ-расцепителя» [19].

Выбор автоматических выключателей питающей сети СЭС ТЦ осуществлён аналогично с приведением полученных результатов в форме таблицы 8.

Таблица 8 – Выбор автоматических выключателей питающей сети СЭС ТЦ

Наименование	$I_p, A$	Марка автомата	$I_{ном.а}, A$	$I_{у.т.р}, A$	$I_{у.э.р}, A$
Питающая ТП-10/0,4 кВ					
Вводной	538,5	ВА 52-39	630	630	6300
Секционный	430,8	ВА 52-39	630	500	5000
ВРУ					
Вводной СШ1	229,1	ВА 53-37	250	250	2500
Вводной СШ2	207,1	ВА 53-37	250	250	2500
Секционный	184,0	ВА 53-37	250	250	2500
СРШ1	127,3	ВА 52-33	160	160	1600
СРШ2	91,3	ВА 52-33	160	125	1250
СРШ3	96,9	ВА 52-33	160	125	1250
СРШ4	49,0	ВА 52-31	100	63	630
СРШ5	50,0	ВА 52-31	100	63	630
ЩРО	19,5	ВА 52-31	100	25	250
ЩАО	2,0	ВА 52-31	100	6,3	63

Для распределительной сети СЭС ТЦ используются автоматы марки ВА 52-31 с номинальным током 100 А на всех линиях. Автоматы марки ВА 52-31 представляют собой низковольтные автоматические выключатели, предназначенные для защиты электрических цепей от перегрузок и коротких замыканий. Эти устройства характеризуются высокой надежностью в работе и способны эффективно функционировать в широком диапазоне напряжений, что делает их подходящими для разнообразных промышленных и гражданских применений. Одной из особенностей автоматов ВА 52-31 является их конструктивная универсальность и возможность модификации в зависимости от специфических требований к электрическим установкам. Кроме того, автоматы обладают высокой степенью защиты, что обеспечивает безопасность как электрических сетей, так и обслуживающего персонала [3].

Выбор автоматических выключателей распределительной сети СЭС ТЦ осуществлён аналогично с приведением полученных результатов в форме таблицы 9.

Таблица 9 – Результаты выбора автоматов распределительной сети

Номер потребителя, п/п	$I_p, A$	Марка автомата	$I_{ном.а}, A$	$I_{у.т.р}, A$	$I_{у.э.р}, A$
<b>Потребители СРШ1</b>					
4	9,9	ВА 52-31	100	16	160
5	17,1	ВА 52-31	100	25	250
6	9,1	ВА 52-31	100	16	160
7	68,1	ВА 52-31	100	80	800
8.1	2,5	ВА 52-31	100	6,3	63
8.2	2,5	ВА 52-31	100	6,3	63
11	6,9	ВА 52-31	100	10	100
20	10,2	ВА 52-31	100	16	160
21	10,2	ВА 52-31	100	16	160
22	5,1	ВА 52-31	100	10	100
<b>Потребители СРШ2</b>					
15.1	3,4	ВА 52-31	100	6,3	25
15.2	3,4	ВА 52-31	100	6,3	25
16	49,7	ВА 52-31	100	63	630
17.1	12,5	ВА 52-31	100	16	160
17.2	12,5	ВА 52-31	100	16	160
18.1	2,1	ВА 52-31	100	6,3	63
18.2	2,1	ВА 52-31	100	6,3	63
19.1	2,1	ВА 52-31	100	6,3	63
19.2	2,1	ВА 52-31	100	6,3	63
<b>Потребители СРШ3</b>					
24.1	8,4	ВА 52-31	100	10	100
24.2	8,4	ВА 52-31	100	10	100
25.1	10,2	ВА 52-31	100	16	160
25.2	10,2	ВА 52-31	100	16	160
26.1	10,2	ВА 52-31	100	16	160
26.2	10,2	ВА 52-31	100	16	160
27	49,7	ВА 52-31	100	63	630
<b>Потребители СРШ4</b>					
9.1	6,9	ВА 52-31	100	10	100
9.2	6,9	ВА 52-31	100	10	100
9.3	6,9	ВА 52-31	100	10	100
10.1	6,9	ВА 52-31	100	10	100
10.2	6,9	ВА 52-31	100	10	100
10.3	6,9	ВА 52-31	100	10	100
10.4	6,9	ВА 52-31	100	10	100
12	6,9	ВА 52-31	100	10	100
<b>Потребители СРШ5</b>					
1	6,9	ВА 52-31	100	10	100
2	5,1	ВА 52-31	100	10	100
3	6,9	ВА 52-31	100	10	100
4.1	24,9	ВА 52-31	100	31,5	315
13	3,4	ВА 52-31	100	6,3	63
14	3,4	ВА 52-31	100	6,3	63
23	5,1	ВА 52-31	100	10	100

«Все выбранные коммутационные и защитные электрические аппараты, выбранные для установки в системе электроснабжения торгового центра, проверены по условиям термической стойкости, динамической устойчивости и соответствию максимальным расчётным токам схемы» [1].

Выводы по разделу.

В работе выбраны рациональные схемы СЭС ТЦ.

В результате выбора схемных решений установлено, что все принятые изменения для внесения в схему СЭС ТЦ, рекомендуемые на всех уровнях данного объекта, актуальны и приведут к улучшению производительности и повышению показателей надёжности, экономичности и безопасности.

Расчитаны электрические нагрузки в СЭС ТЦ.

Окончательно приняты на ТП-10/0,4 кВ СЭС ТЦ, два силовых трансформатора марки ТМ-250/10.

При этом на ТП КУ не устанавливаются.

Расчитаны токи КЗ в СЭС ТЦ.

Выбраны и проверены электрические проводники питающих и распределительных сетей, а также аппараты, для их применения в системе электроснабжения торгового центра классов напряжений 10 кВ и 0,4 кВ, с целью их установки в системе электроснабжения объекта после реконструкции схемы электроснабжения последних.

### **3 Выбор и расчёт релейной защиты и контура заземления**

#### **3.1 Выбор устройств релейной защиты и автоматики**

Устройства релейной защиты и автоматики играют важнейшую роль в современных энергосистемах, обеспечивая надежное функционирование электрических сетей. Их основная задача заключается в защите электрооборудования от повреждений, вызванных аварийными режимами, такими как короткие замыкания, перегрузки и другие нештатные ситуации. Эти устройства не только способствуют сохранению целостности электрических компонентов, но и гарантируют безопасность операционного персонала и пользователей энергосистемы.

Функционирование устройств релейной защиты и автоматики основывается на непрерывном мониторинге параметров работы электрической сети. Они автоматически реагируют на любые аномалии, быстро отключая поврежденные участки сети или регулируя параметры работы системы, что предотвращает развитие аварийной ситуации и минимизирует потери энергии. Это особенно критично для СЭС объектов, где даже небольшие сбои в электроснабжении могут привести к значительным экономическим потерям.

Кроме того, современные устройства релейной защиты и автоматики обладают способностью к самодиагностике и самовосстановлению, что делает их незаменимыми в условиях, требующих высокой автоматизации управления и минимального человеческого вмешательства. Эта функциональность значительно упрощает процесс эксплуатации и обслуживания энергетических объектов, позволяя оперативно выявлять и устранять неисправности.

Благодаря интеграции с современными информационными технологиями устройства релейной защиты и автоматики могут предоставлять данные для системного анализа и оптимизации работы

энергосистем. Это помогает эффективно управлять ресурсами, оптимизировать расход энергии и планировать техническое обслуживание.

Таким образом, устройства релейной защиты и автоматики являются неотъемлемой частью любой современной электроэнергетической системы, обеспечивая ее стабильность, эффективность и безопасность. Они существенно повышают уровень контроля и надежности инфраструктуры, что делает их важным звеном в поддержании непрерывности и качества энергоснабжения.

«Известно, что все электроустановки должны быть оборудованы средствами обеспечения защиты персонала и оборудования от ненормальных режимов. К таким средствам относятся:

- устройства релейной защиты (особенно, защита от коротких замыканий на землю);
- защитная автоматика;
- защитная сигнализация;
- телемеханика и видеонаблюдение;
- защитное заземление (включая переносное);
- защитное зануление (в сети 0,38/0,22 кВ);
- защитное отключение (на электрических аппаратах);
- система блокировок различных уровней и видов.

Далее в работе проводится расчёт релейной защиты и автоматики для защиты системы электроснабжения торгового центра» [9].

«На основании изучения нормативной технической литературы и каталогов продукции, в работе принимается микропроцессорные блоки РЗиА марки IPR-A (производитель – ЗАО «Элтехника»).

Основной функционал данных микропроцессорных блоков» [17] представлен на рисунке 8.



Рисунок 8 – «Основной функционал микропроцессорных блоков РЗиА марки IPR-A (производитель – ЗАО «Элтехника»)» [9]

Микропроцессорные блоки РЗиА марки IPR-A, производимые ЗАО «Элтехника», представляют собой современное решение в области защиты и автоматизации, обеспечивающее высокий уровень контроля и безопасности в энергетических системах. Эти устройства интегрируют передовые технологии в области микропроцессорной техники, что позволяет выполнять сложные функции мониторинга и управления электроустановками с высокой точностью и надежностью.

Блоки IPR-A оснащены микропроцессором, который обрабатывает сигналы в реальном времени и предоставляет обширные возможности для настройки параметров работы системы, что делает их весьма адаптивными к различным условиям эксплуатации и требованиям пользователей. Программируемая логика и гибкие настройки позволяют максимально точно настроить параметры работы блоков, оптимизируя тем самым процессы защиты и управления.

Одной из значимых особенностей блоков IPR-A является их способность к интеграции в различные системы управления и мониторинга, включая SCADA-системы. Данный факт обеспечивает централизованный

доступ к данным и контроль за всеми аспектами работы электроустановок, улучшая тем самым общую эффективность энергосистемы. Кроме того, наличие интерфейсов связи, таких как Ethernet, позволяет осуществлять удаленный мониторинг и управление, а также интеграцию с другими устройствами и системами.

Применение микропроцессорных блоков РЗА марки IPR-A также способствует повышению уровня безопасности электрических установок. Благодаря быстрому отклику на аварийные ситуации и возможности точной настройки параметров защиты, эти устройства минимизируют риски возникновения серьезных аварий, связанных с перегрузками, короткими замыканиями или другими потенциально опасными условиями.

Таким образом, микропроцессорные блоки РЗА IPR-A от ЗАО «Элтехника» являются важным элементом современных энергетических систем, обеспечивающим высокую эффективность, гибкость и безопасность в управлении и защите электрических сетей.

«Ток срабатывания защит от внутренних повреждений в микропроцессорных блоках определяется с учётом коэффициента отстройки от максимального рабочего тока по следующему условию» [17]:

$$I_{с.з} \geq K_{отс} \cdot I_{м}, \quad (57)$$

где « $K_{отс}$  – коэффициент отстройки;

$I_{м}$  – максимальный ток линии, А» [17].

«Ток срабатывания защит от внешних повреждений в микропроцессорных блоках определяется с учётом коэффициента отстройки от максимального тока КЗ по следующему условию [17]:

$$I_{с.з} \geq K_{отс} \cdot I_{к}. \quad (58)$$

«Действительный ток срабатывания защит» [17]:

$$I_{c.p} \geq \frac{I_{c.з}}{K_m}, \quad (59)$$

где « $K_m$  – коэффициент трансформации трансформатора тока» [17].

«В работе применяются следующие виды защит и устройств автоматики для защиты линии выключатель РП 10 кВ – ТП-10/0,4 кВ торгового центра»:

- дифференциальная защита (ДЗ);
- максимальная токовая защита (МТЗ);
- защита от однофазных коротких замыканий на землю (ЗОЗ).

«Уставка срабатывания МТЗ линии выключатель РП 10 кВ – ТП-10/0,4 кВ торгового центра» [17] по условию (57):

$$I_{c.з} \geq 1,1 \cdot 20,2 = 22,3 \text{ A.}$$

«Ток срабатывания ДЗ» [17] по условию (58):

$$I_{c.з} \geq 1,3 \cdot 7,18 = 9,33 \text{ кА.}$$

Результаты расчёта уставок РЗиА СЭС ТЦ сведены в таблицу 10.

Таблица 10 – Результаты выбора типов и уставок РЗиА СЭС ТЦ

Тип РЗиА	Назначение защиты	Ток срабатывания РЗ, А	Время срабатывания РЗ, с
МТЗ	Защита от внутренних повреждений	22,3	0,5
ДЗ	Защита от внешних повреждений	9330,0	0 (без выдержки времени)
ЗОЗ	Защита от коротких замыканий на землю	5,0	0 (без выдержки времени)

«Все технические параметры и уставки РЗиА линии «выключатель РП 10 кВ – ТП-10/0,4 кВ торгового центра» удовлетворяют условиям выбора и проверок по селективности срабатывания и надёжности» [17].

### **3.2 Расчёт контура заземления торгового центра**

Заземление торгового центра выполняет критически важную роль в обеспечении безопасности, надежности и функциональности всей электроэнергетической системы здания. Это основополагающий элемент электробезопасности, который направлен на защиту человеческой жизни, а также предотвращение повреждения электронного и электрического оборудования в случае возникновения аварий или неисправностей.

Заземление обеспечивает контролируемый путь для прохождения электрического тока к земле в случае утечки или пробоя изоляции, что значительно снижает риск поражения электрическим током людей и минимизирует возможность возгорания. Это достигается путем выравнивания потенциалов между заземляемыми объектами и землей, что предотвращает нежелательное возникновение искрения или дуги, способных спровоцировать пожар.

Кроме того, правильно выполненная система заземления способствует улучшению качества электроснабжения. Она стабилизирует напряжение в сети, тем самым повышая эффективность работы и надежность электрических и электронных устройств, которые чувствительны к перепадам напряжения и могут выходить из строя при их возникновении.

Заземление также является неотъемлемой частью системы молниезащиты торговых центров. Оно обеспечивает безопасное отведение молний и других переходных электрических процессов, возникающих при грозовых разрядах, к земле, тем самым защищая структурные элементы здания и технические системы от повреждений.

В контексте эксплуатации СЭС ТЦ, система заземления должна регулярно проверяться и обслуживаться для обеспечения её надлежащего функционирования. Неправильно обустроенная или поврежденная система заземления может привести к серьезным последствиям, включая не только

повреждение оборудования, но и угрозу здоровью и жизни посетителей и персонала.

Таким образом, заземление в СЭС ТЦ выполняет функции, направленные на улучшение безопасности, надежности и функциональности электрической системы, делая его незаменимым компонентом на данном объекте.

«Производится расчёт контура защитного заземления ТП-10/0,4 кВ. Определяется расчетное удельное сопротивление грунта с учётом коэффициентов вертикальных и горизонтальных заземлителей (соответственно  $K_B$  и  $K_G$ )» [16]:

$$\rho_{p.z} = \rho_{y\delta} \cdot K_{n.z}, \quad (60)$$

$$\rho_{p.g} = \rho_{y\delta} \cdot K_{n.g}, \quad (61)$$

где « $\rho_{y\delta}$  – значения удельного сопротивления грунта (для чернозёма), Ом» [16];

« $K_{n.z}$  и  $K_{n.g}$  – нормируемые коэффициенты использования горизонтальных и вертикальных электродов» [15].

$$\rho_{p.z} = 100 \cdot 1,2 = 120 \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

$$\rho_{p.g} = 100 \cdot 1,1 = 110 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

«Определяется сопротивление растекания одного вертикального электрода» [16]:

$$R_B = 0,366 \cdot \frac{\rho_p}{l} \left( \lg \frac{2 \cdot l}{0,95 \cdot d} + 0,5 \lg \frac{4t + 3l}{4t + l} \right), \text{ Ом}, \quad (62)$$

где « $l, t, d$  – принятые габариты и размеры электродов, м» [16].

Значит:

$$R_B = 0,366 \cdot \frac{110}{5} \left( \lg \frac{2 \cdot 5}{0,95 \cdot 0,016} + 0,5 \lg \frac{4 \cdot 1,7 + 3 \cdot 5}{4 \cdot 0,5 + 5} \right) = 48,5 \text{ Ом.}$$

«Число вертикальных заземлителей» [16]:

$$n = \frac{R_{O.B.}}{K_B \cdot R_{з.норм}}, \text{ шт.} \quad (63)$$

$$N = \frac{48,5}{0,66 \cdot 4} = 18,4 \text{ шт.}$$

Принимается  $n = 18$  шт.

Уточнённые значения расчётных параметров контура заземления, с учётом нормированного сопротивления:

$$R_r = \frac{\rho_p}{K_{u.г} \cdot 2\pi \cdot l_2} \cdot \lg \frac{2 \cdot l_2^2}{b \cdot t}, \text{ Ом.} \quad (64)$$

$$R_r = \frac{120}{0,32 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 5} \cdot \lg \frac{2 \cdot 5^2}{0,08 \cdot 0,5} = 22,3 \text{ Ом.}$$

$$R_{г.э.} = \frac{R_B \cdot R_3}{R_B - R_3}, \text{ Ом.} \quad (65)$$

$$R_{г.э.} = \frac{22,3 \cdot 4}{22,3 - 4} = 4,87 \text{ Ом.}$$

Уточнённое значение количества электродов СЭС ТЦ:

$$n = \frac{R_{O.B.}}{K_B \cdot R_{B.E}}, \text{ шт.} \quad (66)$$

$$N = \frac{48,5}{0,66 \cdot 4,87} = 15,1 \text{ шт.}$$

«Исходя из результатов, в проектируемом контуре защитного заземления, принимается шестнадцать вертикальных электродов (ближайшее целое число с учётом коррекции).

С учётом полученного числа электродов, принимается расположение вертикальных электродов контура заземления в форме квадрата (четыре электрода – по длине, 4 – по ширине, 4 ряда).

В виду того, что все требуемые условия документов и методики расчётов выполнены.

Спроектированный контур заземления устанавливается по контуру (периметру) ТП-10/0,4 кВ и подсоединяется к её сети заземления, а также к сети заземления оборудования торгового центра» [17].

Выводы по разделу.

Для применения в СЭС ТЦ выбраны микропроцессорные блоки РЗиА марки IPR-A (производитель – ЗАО «Элтехника»).

Рассчитаны основные типы и уставки релейных защит, линии «выключатель РП 10 кВ – ТП-10/0,4 кВ торгового центра».

Спроектирован контур защитного заземления ТП-10/0,4 кВ с применением шестнадцати вертикальных электродов.

## Заключение

В работе проведена реконструкция схемы электрических соединений системы электроснабжения распределительного пункта напряжением 10 кВ, питающего торговый центр.

Такая реконструкция обусловлена несоответствием установленным нормам по качеству и надёжности, схемы электрических соединений питающей сети объекта исследования.

Кроме того, установлено, что помимо реконструкции схемы, некоторое оборудование питающей и распределительной сети СЭС РП-10 кВ ТЦ устарело и требуют срочной замены, так как значительно увеличилось количество аварий на объекте. Таким образом, в работе осуществлена комплексная замена устаревшего оборудования на объекте исследования совместно с реконструкцией схемы главных электрических соединений.

Для достижения поставленной цели, в работе проведено решение следующих практических задач:

- выбор и обоснование технических изменений, рекомендованных для внесения в схему СЭС РП-10 кВ ТЦ;
- расчёт электрических нагрузок (освещения, силовой и суммарной);
- расчёт токов короткого замыкания;
- выбор и проверка кабелей и коммутационной аппаратуры;
- расчёт и выбор системы релейной защиты и автоматики для применения в СЭС РП-10 кВ ТЦ.

При глубоком анализе питающих схем системы электроснабжения объекта, установлено, что схемы электроснабжения РП 10 кВ, ТП-10/0,4 кВ, а также ВРУ-0,4 кВ торгового центра выполнены без наличия резервирования и могут быть применены только для питания потребителей III категории надёжности.

В виду того, что «большинство потребителей торгового центра, недавно введённых в эксплуатацию, относятся ко II категории надёжности,

следовательно, для их питания необходим второй источник» [12], который в исходной схеме отсутствует.

Таким образом, решение проблемы резервирования в схеме электроснабжения, необходимо решить путём реконструкции питания и схемы электрических соединений на следующих объектах (начиная от источника к потребителю): РП 10 кВ, ТП-10/0,4 кВ, ВРУ-0,4 кВ.

Установлено, что применение рациональных схем резервирования на данных объектах полностью решит данную проблему.

В работе выбраны рациональные схемы СЭС ТЦ.

В результате выбора схемных решений установлено, что все принятые изменения для внесения в схему СЭС ТЦ, рекомендуемые на всех уровнях данного объекта, актуальны и приведут к улучшению производительности и повышению показателей надёжности, экономичности и безопасности.

Рассчитаны электрические нагрузки в СЭС ТЦ.

Окончательно приняты на ТП-10/0,4 кВ СЭС ТЦ, два силовых трансформатора марки ТМ-250/10.

При этом на ТП КУ не устанавливаются.

Рассчитаны токи КЗ в СЭС ТЦ.

Выбраны и проверены электрические проводники питающих и распределительных сетей, а также аппараты, для их применения в системе электроснабжения торгового центра классов напряжений 10 кВ и 0,4 кВ, с целью их установки в системе электроснабжения объекта после реконструкции схемы электроснабжения последних.

Для применения в СЭС ТЦ выбраны микропроцессорные блоки РЗиА марки IPR-A (производитель – ЗАО «Элтехника»).

Рассчитаны основные типы и уставки релейных защит, линии «выключатель РП 10 кВ – ТП-10/0,4 кВ торгового центра».

Спроектирован контур защитного заземления ТП-10/0,4 кВ с применением шестнадцати вертикальных электродов.

## Список используемых источников

1. Кабели АСБ-10 кВ. [Электронный ресурс]: URL: <https://www.rkz.ru/cables/1079/> (дата обращения: 26.04.2024).
2. Кабели ПвВГ. [Электронный ресурс]. URL: [https://k-  
ps.ru/spravochnik/kabeli-silovye/s-izolyacziej-iz-silanolnosshitogo-polietilena-  
\(1kv\)/pvvg/](https://k-ps.ru/spravochnik/kabeli-silovye/s-izolyacziej-iz-silanolnosshitogo-polietilena-(1kv)/pvvg/) (дата обращения: 27.04.2024).
3. Каталог автоматических выключателей ВА. [Электронный ресурс]: URL: [http://www.expoelectro.ru/netcat\\_files/104/42/Katalog\\_avtomaticheskie\\_vyklyuch  
атели\\_Novo\\_vyatka\\_.pdf](http://www.expoelectro.ru/netcat_files/104/42/Katalog_avtomaticheskie_vyklyuchатели_Novo_vyatka_.pdf) (дата обращения: 27.04.2024).
4. Киреева Э.В. Электроснабжение и электрооборудование организаций и учреждений. М.: Кнорус, 2019. 236 с.
5. Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов. М.: Академия, 2021. 400 с.
6. Куксин А.В. Электроснабжение промышленных предприятий. Учебное пособие. М.: Инфра-Инженерия, 2021. 156 с.
7. Немировский А.Е. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций. М.: Инфра-Инженерия, 2020. 174 с.
8. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок (Приказ от 15 декабря 2020 г. № 903н / Приказ от 29 апреля 2022 г. № 279н). Изд-во Мини-Тайп, 2023. 216 с.
9. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. Изд-во ДЕАН, 2022. 192 с.
10. Правила устройства электроустановок. 7-е издание. Изд-во ЦентрМаг, 2022. 584 с.
11. Сибикин Ю.Д. Пособие к курсовому и дипломному проектированию электроснабжения промышленных, сельскохозяйственных и городских объектов. Учебное пособие. М.: Форум, 2021. 383 с.
12. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение промышленных и гражданских

зданий. Учебное пособие. М.: Форум, Инфра-М, 2022. 406 с.

13. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю., Яшков В.А. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. Учебное пособие. М.: Форум, Инфра-М, 2022. 365 с.

14. СП 440.1325800.2018 Проектирование естественного и искусственного освещения. [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/554819713> (дата обращения: 30.04.2024).

15. Устройства защиты, контроля и управления. [Электронный ресурс]: URL: <http://bester54.ru/goods/index.php?type=description&id=2270> (дата обращения: 27.04.2024).

16. Федеральный закон «Об электроэнергетике» от 26.03.2003 № 35-ФЗ об энергосбережении [Электронный ресурс]: URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_41502/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_41502/) (дата обращения: 30.04.2024).

17. Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ (ред. от 29.07.2017) «Об энергосбережении, повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (с изменениями на 13 июня 2023 года). [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/902186281> (дата обращения: 30.04.2024).

18. Фризен В.Э., Назаров С.Л. Расчет и выбор электрооборудования низковольтных распределительных сетей промышленных предприятий. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2021. 184 с.

19. Щербаков Е.Ф., Александров Д.С. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях. М.: Форум, Инфра-М, 2019. 495 с.

20. Энергетическая стратегия РФ на период до 2035 года. Распоряжение Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р. Москва: Министерство энергетики, 2020. 142 с.