

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 Электроснабжение здания организации по выполнению опытно-конструкторских работ

Обучающийся

А.С. Рудоман

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., А.Н. Черненко

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

Тольятти 2022

Аннотация

Данная бакалаврская работа направлена на разработку проекта системы электроснабжения здания организации по выполнению опытно-конструкторских работ.

В ходе выполнения работы были произведены расчёты ожидаемых электрических нагрузок, создаваемых офисным зданием.

Произведены расчёты системы внутреннего искусственного освещения здания, выбран тип светильников, их общее необходимое количество и определена суммарная потребляемая ими мощность.

По итоговому значению расчётной нагрузки, а также дополнительной нагрузки, питаемой от трансформаторной подстанции, была выбрана номинальная мощность необходимых для установки силовых трансформаторов и средств компенсации реактивной мощности.

Выполнен выбор основного электрооборудования системы электроснабжения здания, проводников, коммутационных аппаратов.

Определены значения токов короткого замыкания в характерных точках системы электроснабжения здания, данные значения использовались для проверки коммутационной способности выбранных аппаратов защиты, а также для проверки на недопустимый нагрев выбранных проводников.

Выбраны основные устройства микропроцессорной релейной защиты.

В целом бакалаврская работа состоит из пояснительной записки общим объёмом 57 страниц, содержит 14 таблиц и 3 рисунка, графическая часть работы состоит из 6 чертежей стандартного формата А1.

Содержание

Введение.....	5
1 Краткая характеристика объекта проектирования	7
2 Определение расчётных нагрузок по зданию организации.....	9
2.1 Расчёт ожидаемых нагрузок, создаваемых силовыми электроприемниками зданий	9
2.2 Расчёт ожидаемых нагрузок от системы внутреннего освещения здания	11
2.3 Расчёт общей потребляемой нагрузки по зданиям.....	15
3 Определение количества и номинальной мощности силовых трансформаторов для установки на питающей КТП.....	17
3.1 Определение минимально допустимой по загрузке мощности трансформаторов.....	17
3.2 Определение потерь электрической энергии и затрат на установку на КТП двух силовых трансформаторов мощностью по 630 кВА	19
3.3 Определение потерь электрической энергии и затрат на установку на КТП двух силовых трансформаторов мощностью по 1000 кВА	25
3.4 Сравнение рассмотренных вариантов силовых трансформаторов на КТП различной мощности по приведенным затратам.....	32
4 Выбор электрических аппаратов и проводников для системы внутреннего электроснабжения	33
4.1 Выбор проводников для групповых индивидуальных линий к потребителям	33
4.2 Выбор измерительных трансформаторов тока для установки в ТП.....	38
4.3 Выбор автоматов для защиты групповых линий и основных ЭП	39
4.4 Выбор питающей линии к трансформаторной подстанции	40
5 Определение токов КЗ	41
5.1 Определение сопротивлений, входящих в схему замещения	41
5.2 Определение токов короткого замыкания в расчётных точках	44

6 Выбор параметров защиты силовых трансформаторов, установленных на КТП	48
6.1 Определение сопротивлений элементов.....	48
6.2 Определение величины токов КЗ	49
6.3 Расчет уставок МТО	49
6.4 Определение уставок МТЗ силового трансформатора.....	51
6.5 Выбор терминала микропроцессорной защиты.....	51
Заключение	53
Список используемых источников.....	55

Введение

Выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ является неотъемлемой частью технического прогресса и развития любого современного производства.

В условиях ведения жёстких санкций и ограничений, особенно остро встаёт вопрос быстрой разработки отечественных технологий, компонентов и изделий.

Только профессиональные специализированные организации могут обеспечить быстрое прохождение пути продукта от идеи до опытного образца и его последующей коммерческой реализации.

Такие организации должны обладать обширным штатом высококвалифицированных специалистов в своей области, специальным научно-исследовательским оборудованием, доступом к различным специализированным материалам и компонентам.

У организации должна быть налажена связь с производителями оборудования, поставщиками сырья и комплектующих.

При проведении исследований должен быть доступ к специализированному программному обеспечению, позволяющему выполнять расчёты, 3D моделирование и визуализацию готового изделия.

В настоящее время особенно актуальным является создание цифрового двойника будущего объекта, на котором можно было бы исследовать все его свойства и характеристики при его функционировании в будущей реальной системе.

К системе внутреннего электроснабжения современного офисного здания, в котором располагаются мощные вычислительные станции и автоматизированные линии и программируемые станки для выпуска опытных образцов разрабатываемой продукции предъявляются следующие требования как и к любой системе электроснабжения промышленного предприятия, как то надёжность обеспечения электроэнергией основных потребителей,

безопасность самой системы для обслуживающего персонала и работников организации, экологичность применяемого в системе электроснабжения основного оборудования, возможность проведения текущего ремонта и визуального осмотра элементов системы электроснабжения без затрудненного к ним доступа или демонтажа конструктивных элементов. Отдельным пунктом в требованиях к системе электроснабжения любого офисного здания является общая эстетичность системы электроснабжения, её внешняя незаметность для окружающих, при этом лёгкий доступ к ней в случае необходимости проведения ремонта.

Таким образом, цель выпускной квалификационной работы заключается в разработке элементов проекта системы электроснабжения здания организации по выполнению опытно-конструкторских работ, направленных на повышение надежности электроснабжения потребителей и снижение издержек во время её эксплуатации.

К основным задачам которые планируются решить в данной работе относятся определение ожидаемых электрических нагрузок от офисного здания, расчёт системы внутреннего искусственного освещения, выбор числа и мощности силовых трансформаторов для установки на трансформаторной подстанции, выбор элементов системы внутреннего электроснабжения здания, таких как автоматические выключатели, проводники и кабели, расчёт токов короткого замыкания в различных узлах системы электроснабжения и проверка выбранного электрооборудования на стойкость к ним.

1 Краткая характеристика объекта проектирования

Уже более 15 лет организация выполняет работы по исследованию строительных материалов, разработке новых конструктивных систем зданий и сооружений, разрабатывает программные средства для выполнения расчётов в строительной сфере. Проводятся работы по созданию новых элементов инженерных систем, выполнен ряд исследований в области обеспечения надёжности, безопасности, функциональной и эстетической комфортности, ведутся работы в области разработки новых автоматизированных методов расчёта строительных объектов. Потребителями услуг организации являются ведущие предприятия Липецкой и Московской областей.

«Итоговой целью любой НИОКР является производство специально разработанной продукции, изделий, приборов, в том числе программных средств и различных технологий. Для этого в процессе научных исследований проводятся изыскания, эксперименты и пробный выпуск и тестирование на эффективность опытных образцов продукции/изделий» [16].

Организации принадлежит два отдельно стоящих здания высотой по три этажа каждое, в которых располагаются офисные помещения, лаборатории и производственные помещения для опытного производства.

Рядом с корпусами располагается трансформаторная подстанция, которая обеспечивает их электроэнергией, а также несколько других зданий, расположенных поблизости.

Трансформаторная подстанция получает питание от ГПП, расположенной на расстоянии 5 км по кабельным линиям с напряжением 10 кВ.

Протяжённость линий на напряжение 0,4 кВ от трансформаторной подстанции до водного распределительного устройства внутри зданий составляет порядка 65 м.

Основные электроприёмники, которые располагаются внутри зданий относятся ко второй категории по надёжности электроснабжения, таким

образом для них допустим перерыв в электроснабжении на время ручного включения резерва, но поскольку среди электроприемников имеется группа относящихся к первой категории по надежности электроснабжения, а это электроприёмники системы внутреннего пожаротушения, а также электроприёмники отвечающие за безопасность и охрану периметра здания, система удаления газов и аварийного эвакуационного освещения, то на подстанции предусматривается установка автоматического ввода резерва для обеспечения требований, предъявляемых к электроснабжению электроприемников первой категории.

Вывод по разделу.

Дана краткая характеристика рассматриваемой в работе организации по выполнению опытно-конструкторских работ, перечислены виды деятельности организации, области научных интересов и ведущееся разработки. Приводятся характеристики капитальных строений, параметры внешней и внутренней системы электроснабжения, а также категории по надежности электроснабжения потребителей.

2 Определение расчётных нагрузок по зданию организации

2.1 Расчёт ожидаемых нагрузок, создаваемых силовыми электроприемниками зданий

При проведении расчётов воспользуемся методом расчётного коэффициента, данная методика широко описана в учебных пособиях и справочной литературе и в общем виде имеет следующую последовательность:

«Все электроприемники разбиваются на характерные группы с однородным режимом работы и объединяются по месту подключения.

Для каждой характерной группы определяют:

- среднюю активную мощность за наиболее загруженную смену группы электроприемников одинакового режима работы

$$P_{cpi} = K_u \cdot \sum P_{номi}, \quad (1)$$

где $P_{номi}$ - номинальная мощность рабочих электроприемников,

K_u - групповой коэффициент использования.

- среднюю реактивную мощность за наиболее нагруженную смену для группы электроприемников одинакового режима работы:

$$Q_{cpi} = \sum P_{cp} \cdot \operatorname{tg} \phi, \quad (2)$$

где $\operatorname{tg} \phi$ - соответствует групповому коэффициенту мощности.

Находят суммарную среднюю нагрузку по месту подключения электроприемников:

$$P_{cp\Sigma} = \sum_k P_{cpi}; \quad (3)$$

$$Q_{\text{cp}\Sigma} = \sum_k Q_{\text{cp}i} \cdot \quad (4)$$

Определяют средневзвешанный коэффициент использования для рассматриваемой группы электроприемников:

$$K_{\text{иср}} = \frac{P_{\text{cp}\Sigma}}{\sum P_{\text{ном}}} \cdot \quad (5)$$

Определяется эффективное или приведенное число электроприемников в группе n_3 . Если в результате расчета получили, что $n_3 > n$, то $n_3 = n$.

По упорядоченным диаграммам определяют коэффициент максимума:

$$K_{\text{м}} = f(K_{\text{иср}i}, n_3) \quad (6)$$

Определяется расчетная нагрузка» [2]:

$$P_{\text{р}} = K_{\text{м}} \cdot P_{\text{cp}\Sigma}; \quad (7)$$

$$Q_{\text{р}} = K_{\text{м}} \cdot Q_{\text{cp}\Sigma}; \quad (8)$$

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

где $K_{\text{м}}$ – коэффициент максимума, принимаемый равным единице при эффективном числе электроприемников больше 10 и принимаемый равным 1,1 если эффективное число электроприемников меньше 10 штук.

Полученные в результате вычислений итоговые расчётные нагрузки по активной и реактивной мощности для первого и второго здания заносим в таблицу 1 и 2 соответственно.

Таблица 1 - Итоговые расчётные нагрузки по активной и реактивной мощности для первого здания

Силовые ЭП	$P_p, кВт$	$Q_p, квар$
Этаж №1	149,2	92,46
Этаж №2	74,3	46,04
Этаж №3	71,6	44,37
Чердак	91,7	56,83
Всего по силовым ЭП здания	386,8	302,7

Таблица 2 - Итоговые расчётные нагрузки по активной и реактивной мощности для второго здания

Силовые ЭП	$P_p, кВт$	$Q_p, квар$
Этаж №1	149,2	92,46
Этаж №2	74,3	46,04
Этаж №3	71,6	44,37
Чердак	91,7	56,83
Всего по силовым ЭП здания	386,8	302,7

2.2 Расчёт ожидаемых нагрузок от системы внутреннего освещения здания

«Расчет осветительной нагрузки производится при помощи программного обеспечения DIALux 4.7 Lite.

DIALux - программа для расчёта и дизайна освещения, она разрабатывается с 1994 года DIAL GmbH (Deutsche Institut für Angewandte Lichttechnik) - Немецким Институтом Прикладной Светотехники. Программа распространяется бесплатно и может использовать данные осветительного оборудования любых изготовителей, у

которых имеются электронные базы светильников в формате, поддерживаемом программой DIALux» [3].

При проектировании освещения необходимо добиться соблюдения требований, изложенных как в строительных нормах, так и санитарных нормах и правилах. Согласно этим нормам, освещённость в исследовательских помещениях где ведётся работа за компьютером, нормируется как на горизонтальной рабочей поверхности, так и на вертикальной на уровне экрана монитора, в помещениях где ведётся мелкое опытное производство освещённость нормируется только на высоте рабочей поверхности, а в рекреационных помещениях и местах общего пользования нормы освещённости указываются на уровне пола.

Выполним расчёт необходимого количества светильников для исследовательского помещения лаборатории. Согласно нормативных документов необходимая минимальная средняя освещённость на уровне рабочей поверхности составляет 500 лк [17]. Выбираем для установки в помещениях светильники LTX LED с призматическим рассеивателем. На рисунке 1 приведено распределение уровней освещённости по площади помещения.

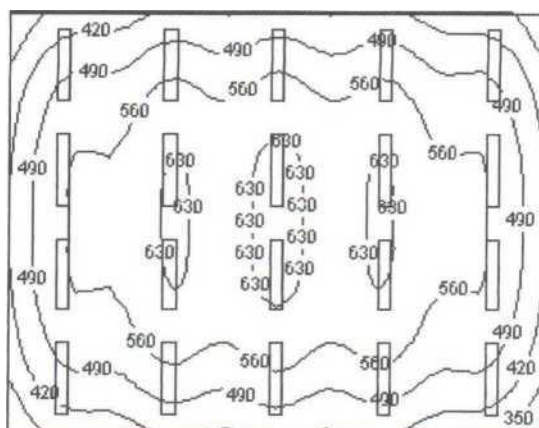


Рисунок 1 - Распределение уровней освещённости по площади помещения

Согласно расчёта, для обеспечения требуемой освещённости на уровне рабочей поверхности необходимо установить 20 светодиодных светильников, при этом их суммарная потребляемая активная мощность составит 0,64 кВт.

Таким же образом в программном комплексе производим расчёт необходимого количества светильников для каждого из помещений, находим также суммарную активную мощность, потребляемую системой освещения, а путем умножения на коэффициент мощности и реактивную мощность, полученные результаты заносим в таблицу 3.

Таблица 3 - Расчётная осветительная нагрузка для каждого из помещений первого этажа первого здания

Краткое наименование	$P_{осв}$, кВт	$Q_{осв}$, квар
Кладовая инвентаря	0,072	0,044
Переход	0,026	0,016
Санузел	0,013	0,008
Тамбур	0,032	0,019
Помещение охраны	0,048	0,029
Коридор	0,026	0,016
Вестибюль	0,13	0,080
Исследовательское помещение	1,152	0,713
Воздухозаборная шахта	0,026	0,016
Исследовательское помещение	0,64	0,45
Тамбур-шлюз	0,013	0,008
Исследовательское помещение	0,64	0,45
Санузел мужской	0,013	0,008
Вестибюль	0,026	0,016
Кладовая спецодежды	0,072	0,044
Исследовательское помещение	1,152	0,713
Тамбур	0,052	0,032
Коридор	0,078	0,048
Вентиляционная камера	0,144	0,089

Продолжение таблицы 3

Краткое наименование	$P_{осв}, кВт$	$Q_{осв}, квар$
Тамбур	0,032	0,019
Гардероб мужской	0,026	0,016
Исследовательское помещение	1,44	0,892
Электрощитовая	0,144	0,089
Помещение уборочного инвентаря	0,072	0,044
Душевая	0,032	0,19
Санузел женский	0,013	0,008
Гардероб женский	0,026	0,16
Санузел	0,013	0,008
Санузел для инвалидов	0,013	0,008
Гардероб	0,036	0,022
Тамбур-шлюз	0,013	0,008
Кроссовая	0,018	0,011
Тамбур	0,078	0,048
Коридор	0,032	0,019
Переход	0,032	0,019
Итого	8,007	4,962

Полученные в результате вычислений итоговые расчётные нагрузки по активной и реактивной мощности, потребляемой системами освещения отдельных помещений на каждом этаже для первого и второго здания заносим в таблицы 4 и 5 соответственно.

Таблица 4 - Итоговые расчётные нагрузки по активной и реактивной мощности, потребляемой системой освещения первого здания

Осветительная нагрузка	$P_p, кВт$	$Q_p, квар$
Этаж №1	9,367	5,802
Этаж №2	9,7	6,01
Этаж №3	10,02	6,2
Общая осветительная нагрузка здания	29,087	18,012

Таблица 5 - Итоговые расчётные нагрузки по активной и реактивной мощности, потребляемой системой освещения второго здания

Осветительная нагрузка	$P_p, \text{кВт}$	$Q_p, \text{квар}$
Этаж №1	9,367	5,802
Этаж №2	9,7	6,01
Этаж №3	10,02	6,2
Общая осветительная нагрузка здания	29,087	18,012

«Мощность аварийного освещения принимается равной 10% от общей активной мощности осветительной нагрузки» [3].

2.3 Расчёт общей потребляемой нагрузки по зданиям

Для определения суммарной активной мощности, потребляемой комплексом зданий, сначала складываем нагрузку силовых электроприемников по обоим зданиям и прибавляем к ней нагрузку от системы освещения с учётом нагрузки системы аварийного освещения [3]:

$$P_{\Sigma} = P_p + 1,1P_{\text{осв}} ; \quad (10)$$

$$P_{\Sigma} = 773,6 + 1,1 \cdot 58,174 = 837,591 \text{ кВт.}$$

Аналогичным образом находим общую реактивную мощность, потребляемую силовыми электроприемниками и системой освещения обоих зданий:

$$Q_{\Sigma} = Q_p + Q_{\text{осв}} ; \quad (11)$$

$$Q_{\Sigma} = 605,4 + 36,024 = 641,424 \text{ квар.}$$

Для нахождения значения тока, протекающего по линии от трансформаторной подстанции к зданиям организации, сначала находим

значение суммарной полной мощности, потребляемой зданиями, а затем делим найденное значение на корень из трех и на номинальное значение напряжения на стороне низкого напряжения трансформаторной подстанции:

$$I_{\Sigma} = \frac{S_{\Sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{H}}; \quad (12)$$

$$I_{\Sigma} = \frac{1054,98}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 1602,87 \text{ А}.$$

Выводы по разделу.

По методу расчётного коэффициента определены суммарные нагрузки, потребляемые силовыми электроприемниками двух зданий. В программе Dialux выполнены расчёты требуемого количества светильников и потребляемой ими мощности для каждого из помещений на всех трёх этажах каждого из зданий, определены суммарные значения мощности и тока, протекающего по линиям от трансформаторной подстанции до здания организации.

3 Определение количества и номинальной мощности силовых трансформаторов для установки на питающей КТП

3.1 Определение минимально допустимой по загрузке мощности трансформаторов

Электроприемники I и II категории рекомендуется обеспечивать питанием от двух независимых, взаимнорезервирующих источников питания. При нарушении электроснабжения от одного из источников питания для электроприемников I категории допустимы перерывы электроснабжения на время автоматического восстановления питания, для электроприемников II категории допустимы перерывы электроснабжения на время, необходимое для включения резервного питания действиями дежурного персонала.

«Таким образом, к установке принимается двухтрансформаторная подстанция.

Мощность одного трансформатора, кВА, при условии полной компенсации реактивной мощности определяется условием

$$S_{н.м.} \geq \frac{P_p}{N \cdot K_3}; \quad (13)$$

где P_p - суммарная расчетная мощность по КТП, кВт;

N - количество трансформаторов на КТП, шт.;

K_3 - коэффициент загрузки трансформаторов, о.е.; при нагрузках I и II категории принимается $K_3 = 0,7$.

$$S_{н.м.} \geq \frac{837,6}{2 \cdot 0,7} = 598,28 \text{ кВА.}$$

Для установки выбираются либо трансформаторы ТМГ-1000/10, либо трансформаторы ТМГ-630/10 со схемой соединения обмоток звезда-звезда с

глухим присоединением нейтрали.

Предварительная проверка по допустимой перегрузке трансформатора ТМГ-1000/10 осуществляется по соотношению [3]:

$$1,4 \cdot S_n \geq P_p; \quad (14)$$

$$1,4 \cdot 1000 = 1400 \geq 837,6.$$

Выполнение условия показывает, что в случае возникновения аварийной ситуации, трансформатор выбранной мощности 1000 кВА может достаточно долго обеспечивать питание всей нагрузки обоих зданий организации.

Определим коэффициент загрузки силового трансформатора мощностью 1000 кВА при протекании через него только активной нагрузки потребителей и полной компенсации реактивной составляющей:

$$K_{з.д.} = \frac{P_p}{N \cdot S_{н.т.}}; \quad (15)$$

$$K_{з.д.} = \frac{837,6}{2 \cdot 1000} = 0,41;$$

Предварительная проверка по допустимой перегрузке трансформатора ТМГ-630/10 осуществляется по соотношению:

$$1,4 \cdot S_n \geq P_p; \quad (16)$$

$$1,4 \cdot 630 = 882 \geq 837,6.$$

Выполнение условия показывает, что в случае возникновения аварийной ситуации, трансформатор выбранной мощности 630 кВА может достаточно долго обеспечивать питание всей нагрузки обоих зданий организации.

Определим коэффициент загрузки силового трансформатора мощностью 630 кВА при протекании через него только активной нагрузки потребителей и полной компенсации реактивной составляющей:

$$K_{з.д.} = \frac{P_p}{N \cdot S_{н.т.}}; \quad (17)$$

$$K_{з.д.} = \frac{837,6}{2 \cdot 630} = 0,66.$$

3.2 Определение потерь электрической энергии и затрат на установку на КТП двух силовых трансформаторов мощностью по 630 кВА

Исходя из доступных в интернет источниках сведений о технических характеристиках выбранного трансформатора марки ТМГ-630/10 в таблицу 6 сводим необходимые для расчётов данные о потерях в трансформаторе, напряжении короткого замыкания и токах холостого хода.

Таблица 6 - Данные о потерях в трансформаторе ТМГ-630/10, напряжении короткого замыкания и токах холостого хода

$P_{xx}, \text{кВт}$	$P_{кз}, \text{кВт}$	K_3	$U_{кз}, \%$	$S_n, \text{кВА}$	$I_{xx}, \%$
0,94	7,6	0,70	5,5	630	1,6

Определим величину суммарных потерь активной и реактивной мощности в силовых трансформаторах подстанции.

Определение потерь активной мощности производится с учётом количества установленных на подстанции трансформаторов, а также их коэффициента загрузки по мощности в нормальном режиме работы:

$$\Delta P_{m\Sigma} = 2 \cdot (P_{xx} + K_3^2 \cdot P_{кз}); \quad (18)$$

где P_{xx} - потери на холостом ходу;

K_3 – коэффициент загрузки;

$P_{кз}$ - потери в режиме короткого замыкания;

$$\Delta P_{m\Sigma} = 2 \cdot (0,94 + 0,7^2 \cdot 7,6) = 6,664 \text{ кВт.}$$

Значение потерь реактивной мощности в СТ:

$$\Delta Q_{m\Sigma} = 2 \cdot (I_{xx} + K_3^2 \cdot U_{кз}) \cdot \frac{S_n}{100}; \quad (19)$$

где I_{xx} - ток холостого хода СТ;

$U_{кз}$ - напряжение КЗ;

S_n - номинальная мощность;

$$\Delta Q_{m\Sigma} = 2 \cdot (1,6 + 0,7^2 \cdot 5,5) \cdot \frac{630}{100} = 54,1 \text{ квар.}$$

Значение активной мощности на стороне высокого напряжения трансформаторной подстанции получаем путём сложения расчётной активной нагрузки двух зданий и потерь активной мощности в силовых трансформаторах:

$$P_{общ} = P_{расч} + \Delta P_{m\Sigma}; \quad (20)$$

$$P_{общ} = 837,6 + 6,664 = 844,264 \text{ кВт.}$$

Значение реактивной мощности на стороне высокого напряжения трансформаторной подстанции по аналогии с активной мощностью получаем путём сложения расчётной реактивной нагрузки двух зданий и потерь реактивной мощности в силовых трансформаторах:

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{расч}} + \Delta Q_{m\Sigma}; \quad (21)$$

$$Q_{\text{общ}} = 641,424 + 54,1 = 695,524 \text{ квар.}$$

Объём потребляемой реактивной мощности в период минимальной нагрузки в энергосистеме принимаем приближённо равным 50% от нормального ее потребления:

$$Q_{\text{мин}} = \frac{Q_{\text{общ}}}{2}; \quad (22)$$

$$Q_{\text{мин}} = \frac{695,524}{2} = 347,762 \text{ квар.}$$

Определяем два экономических значения передаваемой реактивной мощности в период максимальной нагрузки в энергосистеме по следующим формулам:

$$Q'_{\text{э1}} = Q_{\text{общ}} - 0,7 \cdot Q_{\text{сд}}; \quad (23)$$

$$Q''_{\text{э1}} = \alpha \cdot P_{\text{общ}}. \quad (24)$$

«где $Q_{\text{сд}}$ - реактивная мощность, генерируемая синхронными двигателями, ввиду установки конденсаторных батарей принимается равной 0,

α - расчетный коэффициент, соответствующий установленным предприятию условиям получения от энергосистемы мощностей, определяется согласно [4] и для регионов Средней Волги принимается равным 0,28 при высшем напряжении 110 кВ» [3].

$$Q'_{\text{э1}} = 695,524 - 0,7 \cdot 0 = 695,524 \text{ квар.};$$

$$Q''_{\text{э1}} = 0,28 \cdot 844,264 = 236,39 \text{ квар.}$$

В дальнейших расчётах для режима максимальной нагрузки принимаем меньше из двух найденных значений, а именно $Q'_{\varepsilon 1} = 236,39$ квар.

«Экономически обоснованные значения реактивной мощности в режиме наименьших нагрузок» [10]:

$$Q'_{\varepsilon 2} = Q_{\min} = 347,762 \text{ квар.}$$

$$Q''_{\varepsilon 2} = Q_{\min} - (Q_{\text{общ}} - Q_{\varepsilon 1}); \quad (25)$$

$$Q''_{\varepsilon 2} = 347,762 - (695,524 - 236,29) = -111,3 \text{ квар.}$$

В дальнейших расчётах для режима минимальной нагрузки принимаем большее из двух найденных значений, а именно $Q'_{\varepsilon 2} = Q_{\min} = 347,762$ квар.

Определяем необходимый диапазон компенсации реактивной мощности в режиме наибольших и наименьших нагрузок с целью выбора статичных или регулируемых устройств компенсации:

$$Q_{KV.\max} = 1,1 \cdot Q_{\text{общ}} - Q_{\varepsilon 1}; \quad (26)$$

$$Q_{KV.\max} = 1,1 \cdot 695,524 - 236,29 = 528,68 \text{ квар};$$

$$Q_{KV.\min} = Q_{\min} - Q_{\varepsilon 2}; \quad (27)$$

$$Q_{KV.\min} = 347,762 - 347,762 = 0 \text{ квар.}$$

Поскольку найденный диапазон начинается от нулевого значения, то все выбираемые устройства компенсации должны быть регулируемые.

Находим величину реактивной мощности, которую экономически целесообразно передавать из сети высокого напряжения в сеть низкого напряжения без компенсации:

$$Q_{\text{эн}} = Q_{\varepsilon 1} - (Q_{\text{общ}} - Q_{\text{расч}}); \quad (28)$$

$$Q_{\text{эн}} = 236,39 - (695,524 - 641,42) = 182,29 \text{ квар.}$$

Определяем физический объём реактивной мощности, который может быть передан через выбранную мощность силовых трансформаторов с заданным коэффициентом загрузки:

$$Q_m = \sqrt{(N \cdot K_z \cdot S_{ном.т})^2 - P_{расч}^2}; \quad (29)$$
$$Q_m = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 630)^2 - 837,6^2} = 276 \text{ квар.}$$

Находим величину реактивной мощности на стороне низкого напряжения, которую необходимо компенсировать:

$$Q_{KV.н} = Q_{расч} - Q_m; \quad (30)$$
$$Q_{KV.н} = 641,42 - 276 = 365,42 \text{ квар.}$$

По полученному в результате расчётов значению выбираем две автоматические установки компенсации реактивной мощности отечественного производства типа АУКРМ-160 с максимальной выдаваемой реактивной мощностью 160 квар каждой установкой.

Находим величину реактивной мощности на стороне высокого напряжения, которую необходимо компенсировать:

$$Q_{KV.в} = Q_{KV.мах} - Q_{KV.н}; \quad (31)$$
$$Q_{KV.в} = 528,68 - 365,42 = 163,26 \text{ квар.}$$

Поскольку полученное значение меньше порогового значения в 800 квар, то установка средств компенсации реактивной мощности на стороне высокого напряжения трансформаторной подстанции является экономически неоправданной.

Определяем величину приведённых затрат на размещение в КТП 2 трансформаторов мощностью 630 кВА:

$$Z_{КТП} = E \cdot K_{ТП} + C \cdot \Delta P_m; \quad (32)$$

где «E=0,223,

$K_{ТП}$ =664348 руб. - стоимость КТП,

$C \Delta P_T$ - стоимость потерь мощности в трансформаторах» [3].

$$C \cdot \Delta P_m = C_0 \cdot \Delta P_{xx} + C \cdot K_3^2 \cdot \Delta P_{кз}; \quad (33)$$

$$C_0 = \left(\frac{\alpha}{T_m} + \beta \cdot 10^{-2} \right) \cdot T_p; \quad (34)$$

$$C = \left(\frac{\alpha}{T_m} + \beta \cdot 10^{-2} \right) \cdot \tau. \quad (35)$$

«где α - плата за 1кВт максимальной нагрузки;

β - плата за 1кВтч потребленной электроэнергии;

T_m - время использования максимальной нагрузки предприятия в год, принимается равным 3200ч.;

T_p - время работы трансформатора в году, принимается равным 8760ч;

τ - время максимальных потерь» [9].

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_m}{10000} \right)^2 \cdot 8760; \quad (36)$$

$$\tau = \left(0,124 + \frac{3200}{10000} \right)^2 \cdot 8760 = 3889,4 \text{ ч.}$$

$$C_0 = \left(\frac{301,2}{3200} + 0,594 \cdot 10^{-2} \right) \cdot 8760 = 876,21 \frac{\text{руб}}{\text{кВт}};$$

$$C = \left(\frac{301,2}{3200} + 0,594 \cdot 10^{-2} \right) \cdot 3889,4 = 389,19 \frac{\text{руб}}{\text{кВт}};$$

$$C_0 \cdot \Delta P_{xx} + C \cdot K_3^2 \cdot \Delta P_{кз} = 876,21 \cdot 0,94 + 389,19 \cdot 0,7^2 \cdot 7,6 = 2272,98 \text{ руб};$$

$$Z_{КТП} = 0,223 \cdot 664348 + 2272,98 = 150422,58 \text{ руб.}$$

Определяем величину приведённых затрат на размещение в КТП 2

автоматизированных установок компенсации реактивной мощности по 160 кВА [14]:

$$Z_{KY} = E \cdot K_y \cdot N_{KY}; \quad (37)$$

где $K_y=10\ 525$ руб. - стоимость выбранных конденсаторных установок по [26];

N_{KY} - количество принятых установок компенсации реактивной мощности на стороне низкого напряжения.

$$Z_{KY} = 0,223 \cdot 10525 \cdot 2 = 4694,15 \text{ руб.}$$

Суммарное значение приведённых затрат на установку комплектной трансформаторной подстанции получаем путем суммирования полученных значений для силовых трансформаторов и автоматизированных устройств компенсации реактивной мощности [4]:

$$Z_{\Sigma} = Z_{КТП} + Z_{KY}; \quad (38)$$

$$Z_{\Sigma} = 150422,58 + 4694,15 = 155116,73 \text{ руб.}$$

3.3 Определение потерь электрической энергии и затрат на установку на КТП двух силовых трансформаторов мощностью по 1000 кВА

Исходя из доступных в интернет источниках сведений о технических характеристиках выбранного трансформатора марки ТМГ-1000/10 в таблицу 7 сводим необходимые для расчётов данные о потерях в трансформаторе, напряжении короткого замыкания и токах холостого хода.

Таблица 7 - Данные о потерях в трансформаторе ТМГ-1000/10, напряжении короткого замыкания и токах холостого хода

$P_{xx}, \text{кВт}$	$P_{кз}, \text{кВт}$	K_3	$U_{кз}, \%$	$S_n, \text{кВА}$	$I_{xx}, \%$
1,55	10,80	0,70	5,5	1000	1,2

Определим величину суммарных потерь активной и реактивной мощности в силовых трансформаторах подстанции.

Определение потерь активной мощности производится с учётом количества установленных на подстанции трансформаторов, а также их коэффициента загрузки по мощности в нормальном режиме работы:

$$\Delta P_{m\Sigma} = 2 \cdot (P_{xx} + K_3^2 \cdot P_{кз}); \quad (39)$$

$$\Delta P_{m\Sigma} = 2 \cdot (1,55 + 0,7^2 \cdot 10,8) = 13,684 \text{ кВт}.$$

Определяем потери реактивной мощности в силовых трансформаторах подстанции исходя из известных паспортных данных по току холостого хода, напряжению короткого замыкания, номинальной мощности выбранных трансформаторов, а также принятом исходя из категории надёжности электроснабжения потребителей коэффициенте загрузки трансформаторов:

$$\Delta Q_{m\Sigma} = 2 \cdot (I_{xx} + K_3^2 \cdot U_{кз}) \cdot \frac{S_n}{100}; \quad (40)$$

$$\Delta Q_{m\Sigma} = 2 \cdot (1,2 + 0,7^2 \cdot 5,5) \cdot \frac{1000}{100} = 77,9 \text{ квар}.$$

Значение активной мощности на стороне высокого напряжения трансформаторной подстанции получаем путём сложения расчётной активной нагрузки двух зданий и потерь активной мощности в силовых трансформаторах:

$$P_{\text{общ}} = P_{\text{расч}} + \Delta P_{\text{т}\Sigma}; \quad (41)$$

$$P_{\text{общ}} = 837,6 + 13,684 = 851,284 \text{ кВт.}$$

Значение реактивной мощности на стороне высокого напряжения трансформаторной подстанции по аналогии с активной мощностью получаем путём сложения расчётной реактивной нагрузки двух зданий и потерь реактивной мощности в силовых трансформаторах:

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{расч}} + \Delta Q_{\text{т}\Sigma}; \quad (42)$$

$$Q_{\text{общ}} = 641,424 + 77,9 = 719,324 \text{ квар.}$$

Объём потребляемой реактивной мощности в период минимальной нагрузки в энергосистеме принимаем приблизительно равным 50% от нормального ее потребления:

$$Q_{\text{мин}} = \frac{Q_{\text{общ}}}{2}; \quad (43)$$

$$Q_{\text{мин}} = \frac{719,324}{2} = 359,662.$$

Определяем два экономических значения передаваемой реактивной мощности в период максимальной нагрузки в энергосистеме по следующим формулам:

$$Q'_{\text{э1}} = Q_{\text{общ}} - 0,7 \cdot Q_{\text{сд}}; \quad (44)$$

$$Q''_{\text{э1}} = \alpha \cdot P_{\text{общ}}. \quad (45)$$

«где $Q_{\text{сд}}$ - реактивная мощность, генерируемая синхронными двигателями, ввиду установки конденсаторных батарей принимается равной 0,

α - расчетный коэффициент, соответствующий установленным предприятию условиям получения от энергосистемы мощностей, определяется согласно [4] и для регионов Средней Волги принимается равным 0,28 при высшем напряжении 110 кВ» [3].

$$Q'_{\vartheta 1} = 719,324 - 0,7 \cdot 0 = 719,324 \text{ квар};$$

$$Q''_{\vartheta 1} = 0,28 \cdot 851,284 = 238,359 \text{ квар}.$$

В дальнейших расчётах для режима максимальной нагрузки принимаем меньше из двух найденных значений, а именно $Q''_{\vartheta 1} = 238,359 \text{ квар}$.

«Экономически обоснованные значения реактивной мощности в режиме наименьших нагрузок» [10]:

$$Q'_{\vartheta 2} = Q_{\text{мин}} = 359,662 \text{ квар}.$$

$$Q''_{\vartheta 2} = Q_{\text{мин}} - (Q_{\text{общ}} - Q_{\vartheta 1}); \quad (46)$$

$$Q''_{\vartheta 2} = 359,662 - (719,32 - 238,359) = -111,3 \text{ квар}.$$

В дальнейших расчётах для режима минимальной нагрузки принимаем большее из двух найденных значений, а именно $Q'_{\vartheta 2} = Q_{\text{мин}} = 359,662 \text{ квар}$.

Определяем необходимый диапазон компенсации реактивной мощности в режиме наибольших и наименьших нагрузок с целью выбора статичных или регулируемых устройств компенсации:

$$Q_{KV.\text{max}} = 1,1 \cdot Q_{\text{общ}} - Q_{\vartheta 1}; \quad (47)$$

$$Q_{KV.\text{max}} = 1,1 \cdot 719,32 - 238,359 = 552,893 \text{ квар};$$

$$Q_{KV.\text{мин}} = Q_{\text{мин}} - Q_{\vartheta 2}; \quad (48)$$

$$Q_{KV.\text{мин}} = 359,662 - 359,662 = 0 \text{ квар}.$$

Поскольку найденный диапазон начинается от нулевого значения, то все выбираемые устройства компенсации должны быть регулируемы.

Находим величину реактивной мощности, которую экономически целесообразно передавать из сети высокого напряжения в сеть низкого напряжения без компенсации:

$$Q_{эн} = Q_{э1} - (Q_{общ} - Q_{расч}); \quad (49)$$

$$Q_{эн} = 238,359 - (719,32 - 641,42) = 160,46 \text{ квар.}$$

Определяем физический объём реактивной мощности, который может быть передан через выбранную мощность силовых трансформаторов с заданным коэффициентом загрузки:

$$Q_m = \sqrt{(N \cdot K_z \cdot S_{ном.т})^2 - P_{расч}^2}; \quad (50)$$

$$Q_m = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 1000)^2 - 837,6^2} = 1122 \text{ квар.}$$

Находим величину реактивной мощности на стороне низкого напряжения, которую необходимо компенсировать:

$$Q_{KV.н} = Q_{расч} - Q_m; \quad (51)$$

$$Q_{KV.н} = 641,42 - 1122 = -480,58 \text{ квар.}$$

Находим величину реактивной мощности на стороне высокого напряжения, которую необходимо компенсировать:

$$Q_{KV.в} = Q_{KV.мах} - Q_{KV.н}; \quad (52)$$

$$Q_{KV.в} = 552,893 + 480,58 = 1033,47 \text{ квар.}$$

Поскольку полученное значение больше порогового значения в 800 квар, то установка средств компенсации реактивной мощности на стороне высокого напряжения трансформаторной подстанции является экономически оправданной. По полученному в результате расчётов значению выбираем две установки компенсации реактивной мощности отечественного производства типа УК-10,5-450 с максимальной выдаваемой реактивной мощностью 450 квар каждой установкой.

Определяем величину приведённых затрат на размещение в КТП 2 трансформаторов мощностью 1000 кВА:

$$Z_{\text{КТП}} = E \cdot K_{\text{ТП}} + C \cdot \Delta P_m; \quad (53)$$

где «E=0,223,

$K_{\text{ТП}}$ =982044 руб. - стоимость КТП,

$C \Delta P_{\text{T}}$ - стоимость потерь мощности в трансформаторах» [3].

$$C \cdot \Delta P_m = C_0 \cdot \Delta P_{\text{xx}} + C \cdot K_3^2 \cdot \Delta P_{\text{кз}}; \quad (54)$$

$$C_0 = \left(\frac{\alpha}{T_m} + \beta \cdot 10^{-2} \right) \cdot T_p; \quad (55)$$

$$C = \left(\frac{\alpha}{T_m} + \beta \cdot 10^{-2} \right) \cdot \tau. \quad (56)$$

«где α - плата за 1кВт максимальной нагрузки;

β - плата за 1кВтч потребленной электроэнергии;

T_m - время использования максимальной нагрузки предприятия в год, принимается равным 3200ч.;

T_p - время работы трансформатора в году, принимается равным 8760ч;

τ - время максимальных потерь» [3].

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_m}{10000} \right)^2 \cdot 8760; \quad (57)$$

$$\tau = \left(0,124 + \frac{3200}{10000}\right)^2 \cdot 8760 = 3889,4 \text{ ч.}$$

$$C_0 = \left(\frac{301,2}{3200} + 0,594 \cdot 10^{-2}\right) \cdot 8760 = 876,21 \frac{\text{руб}}{\text{кВт}};$$

$$C = \left(\frac{301,2}{3200} + 0,594 \cdot 10^{-2}\right) \cdot 3889,4 = 389,19 \frac{\text{руб}}{\text{кВт}};$$

$$C_0 \cdot \Delta P_{\text{xx}} + C \cdot K_3^2 \cdot \Delta P_{\text{кз}} = 876,21 \cdot 1,55 + 389,19 \cdot 0,7^2 \cdot 10,8 = 3417,71 \text{ руб};$$

$$Z_{\text{КТП}} = 0,223 \cdot 982044 + 3417,71 = 222413,52 \text{ руб.}$$

Определяем величину приведённых затрат на размещение в КТП 2 высоковольтных установок компенсации реактивной мощности по 450 кВА [12]:

$$Z_{\text{кУ}} = E \cdot K_{\text{У}} \cdot N_{\text{кУ}}; \quad (58)$$

где $K_{\text{У}}=39\,950,00$ руб. - стоимость выбранных конденсаторных установок по [4];

$N_{\text{кУ}}$ - количество принятых установок компенсации реактивной мощности на стороне высокого напряжения.

$$Z_{\text{кУ}} = 0,223 \cdot 39950 \cdot 2 = 18817,7 \text{ руб.}$$

Суммарное значение приведённых затрат на установку комплектной трансформаторной подстанции получаем путем суммирования полученных значений для силовых трансформаторов и устройств компенсации реактивной мощности [14]:

$$Z_{\Sigma} = Z_{\text{КТП}} + Z_{\text{кУ}}; \quad (59)$$

$$Z_{\Sigma} = 222413,52 + 18817,7 = 241231,22 \text{ руб.}$$

3.4 Сравнение рассмотренных вариантов силовых трансформаторов на КТП различной мощности по приведенным затратам

Суммарная величина приведенных затрат при размещении на КТП двух СТ ТМГ-630/10 и двух автоматизированных конденсаторных установок типа АУКРМ-0,38-160 составляют 155116,73 рублей.

Суммарная величина приведенных затрат при размещении на КТП двух СТ ТМГ- 1000/10 и двух автоматизированных конденсаторных установок типа АУКРМ -10,5-450 составляют 241231,22 руб.

Таким образом, сопоставляя полученные значения приведенных затрат и годовых потерь в трансформаторах КТП выбираем наиболее оптимальный вариант установки двух СТ типа ТМГ-630/10 с установкой средств компенсации РМ на стороне низкого напряжения ТП.

Выводы по разделу.

Определена необходимая номинальная мощность силовых трансформаторов для установки на КТП. По условию надежности электроснабжения электроприемников организации, для установки выбрано два силовых трансформатора для того, чтобы коэффициент загрузки в нормальном режиме работы не превышал допустимое для данных категорий по надежности электроснабжения значений, мощность силовых трансформаторов не должна быть ниже 630 кВА. Произведено технико-экономическое сравнение установки на КПП трансформаторов различной мощности, при этом определена необходимая мощность устройств компенсации. Наиболее экономичным вариантом, как с точки зрения приведённых затрат на установку основного оборудования КПП, так и с точки зрения потерь электрической энергии стал вариант с установкой на КТП двух трансформаторов ТМГ-630 и 2 автоматизированных конденсаторных установок мощностью по 160 квар каждая.

4 Выбор электрических аппаратов и проводников для системы внутреннего электроснабжения

4.1 Выбор проводников для групповых индивидуальных линий к потребителям

«Для каждой группы электроприемников определяется номинальный или рабочий ток согласно формуле» [13]:

$$I_p = \frac{\sqrt{P_n^2 + (P_n \cdot \operatorname{tg} \varphi)^2}}{\sqrt{3} \cdot 0,38}; \quad (60)$$

- Находим значение рабочего тока на вводе вводно-распределительного устройства №1:

$$I_p = \frac{\sqrt{208,19^2 + 208,19^2 \cdot 0,62^2}}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 372,61 \text{ A};$$

- Находим значение рабочего тока на вводе вводно-распределительного устройства №2:

$$I_p = \frac{\sqrt{209^2 + 209^2 \cdot 0,62^2}}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 374,06 \text{ A};$$

- Находим значение рабочего тока, протекающего через секционный выключатель:

$$I_p = \frac{\sqrt{35,9^2 + 35,9^2 \cdot 0,62^2}}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 64,25 \text{ A};$$

- Находим значение рабочего тока, протекающего по линии к щиту освещения на первом этаже:

$$I_p = \frac{\sqrt{9,367^2 + 9,367^2 \cdot 0,62^2}}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 16,74 \text{ A};$$

- Находим значение рабочего тока, протекающего по линии к шкафу распределительному на первом этаже:

$$I_p = \frac{\sqrt{68,9^2 + 68,9^2 \cdot 0,62^2}}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 123,17 \text{ A};$$

- Находим значение рабочего тока, протекающего по линии к встроенному шкафу распределительному, расположенному на первом этаже:

$$I_p = \frac{\sqrt{53,3^2 + 53,3^2 \cdot 0,62^2}}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 95,28 \text{ A};$$

- Находим значение рабочего тока, протекающего по линии к щиту аварийного освещения на первом этаже, линия выбирается по суммарному значению нагрузки нескольких шкафов:

$$I_p = \frac{\sqrt{2,3^2 + 2,3^2 \cdot 0,62^2}}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 4,1 \text{ A};$$

- Находим значение рабочего тока, протекающего по линии к силовому шкафу распределительному на первом этаже:

$$I_p = \frac{\sqrt{22,4^2 + 22,4^2 \cdot 0,62^2}}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 40,04 \text{ A};$$

- Находим значение рабочего тока, протекающего по линии к распределительному шкафу на первом этаже:

$$I_p = \frac{\sqrt{3,6^2 + 3,6^2 \cdot 0,62^2}}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 6,4 \text{ A};$$

- Находим значение рабочего тока, протекающего по линии к щиту освещения на втором этаже:

$$I_p = \frac{\sqrt{9,7^2 + 9,7^2 \cdot 0,62^2}}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 17,34 \text{ A};$$

- Находим значение рабочего тока, протекающего по линии к шкафу распределительному на втором этаже:

$$I_p = \frac{\sqrt{74,3^2 + 74,3^2 \cdot 0,62^2}}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 132,82 \text{ A};$$

- Находим значение рабочего тока, протекающего по линии к щиту аварийного освещения на втором этаже, линия выбирается по суммарному значению нагрузки щитов второго и третьего этажей:

$$I_p = \frac{\sqrt{1,2^2 + 1,2^2 \cdot 0,62^2}}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 2,1 \text{ A};$$

- Находим значение рабочего тока, протекающего по линии к щиту

освещения на втором этаже:

$$I_p = \frac{\sqrt{9,7^2 + 9,7^2 \cdot 0,62^2}}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 17,34 A;$$

- Находим значение рабочего тока, протекающего по линии к щиту распределительному на третьем этаже:

$$I_p = \frac{\sqrt{74,3^2 + 74,3^2 \cdot 0,62^2}}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 132,82 A;$$

- Находим значение рабочего тока, протекающего по линии к щиту аварийного освещения на третьем этаже:

$$I_p = \frac{\sqrt{0,5^2 + 0,5^2 \cdot 0,62^2}}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 0,9 A;$$

- Находим значение рабочего тока, протекающего по линии к лифтовой установке:

$$I_p = \frac{\sqrt{4,6^2 + 4,6^2 \cdot 1,16^2}}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 10,7 A;$$

- Находим значение рабочего тока, протекающего по линии к системе дымоудаления:

$$I_p = \frac{\sqrt{3^2 + 3^2 \cdot 0,62^2}}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 5,3 A;$$

- Находим значение рабочего тока, протекающего по линии к вентиляционной установке:

$$I_p = \frac{\sqrt{88,7^2 + 88,7^2 \cdot 0,62^2}}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 158,56 \text{ A.}$$

В соответствии с условиями, изложенными в [11], выбор сечения проводов и кабелей производим по значениям длительно допустимого тока, указанным производителем, при этом учитываем понижающие коэффициенты, зависящие от способа прокладки проводника, температуры внешней среды и количество проложенных вместе проводников. Результаты выбора сечений проводников сводим в таблицу 8.

Таблица 8 - Результаты выбора сечений проводников

Линия к ЭП	I_p, A	Выбранный тип кабеля и сечение
Линия к вводу вводно-распределительного устройства №1	372,61	АПВБбШв 4x120
Линия к распределительному шкафу на первом этаже	6,4	ВВГнг-LS 5x2.5
Линия к вводу вводно-распределительного устройства №2	374,06	АПВБбШв 4x120
Линия к силовому шкафу распределительному на первом этаже	40,04	ВВГнг-LS 5x10
Линия к секционному шкафу	64,25	ВВГнг-LS 5x25
Линия к щиту аварийного освещения на первом этаже	4,1	ВВГнг-FRLS 5x4
Линия к щиту освещения на первом этаже	16,74	ВВГнг-LS 5x6
Линия к встроенному шкафу распределительному на первом этаже	95,28	ВВГнг-LS 5x50
Линия к шкафу распределительному на первом этаже	123,17	ВВГнг-LS 5x70
Линия к щиту освещения на втором этаже	17,34	ВВГнг-LS 5x6

Продолжение таблицы 8

Линия к ЭП	I_p, A	Выбранный тип кабеля и сечение
Линия к шкафу распределительному на втором этаже	132,82	ВВГнг-LS 5x70
Линия к вентиляционной установке	158,56	ВВГнг-LS 5x120
Линия к щиту аварийного освещения на втором этаже	2,1	ВВГнг-FRLS 5x4
Линия к системе дымоудаления	5,3	ВВГнг-FRLS 5x2.5
Линия к щиту освещения на третьем этаже	17,34	ВВГнг-LS 5x6
Линия к лифтовой установке	10,7	ВВГнг-LS 5x4
Линия к щиту распределительному на третьем этаже	119,77	ВВГнг-LS 5x70
Линия к щиту аварийного освещения на третьем этаже	0,9	ВВГнг-FRLS 5x4

Для размещения выбранного коммутационного оборудования выбираем шкафы серии Prizma, производства фирмы Schneider Electric.

4.2 Выбор измерительных трансформаторов тока для установки в ТП

«На стороне 10 кВ к установке принимаем трансформатор тока ТП1Л-СЭЩ-10 с коэффициентом трансформации 1000/5, класса точности 0,5; частотой 50 Гц, номинальный первичный ток 1000А, номинальный вторичный ток 5 А» [15].

На стороне низкого напряжения трансформаторной подстанции на фигурах линию отходящих к рассматриваемой в работе зданием выбираем измерительные трансформаторы тока ТШЛ-СЭЩ 0,66-01 с первичным током равным 500 ампер, и вторичным значением равным 5 ампер, для проведения измерений выбираем класс точности 0,5.

4.3 Выбор автоматов для защиты групповых линий и основных ЭП

Для защиты линий от сверхтоков выбираем автоматические выключатели типа Compact NSX. Результаты определения расчётных токов, тип выбранного выключателя и уставку теплового расцепителя заносим в таблицу 9.

Таблица 9 - Результаты определения расчётных токов, тип выбранного выключателя и уставки теплового расцепителя

Линия к ЭП	I_p, A	Тип АВ	$I_{расц}, A$
Линия к вводу вводно-распределительного устройства №1	307,41	NSX400F	310
Линия к вводу вводно-распределительного устройства №2	374,61	NSX400F	380
Линия к щиту освещения на первом этаже	16,74	TM20D NSX100F	20
Линия к силовому шкафу распределительному на первом этаже	123,17	TM160D NSX160B	125
Линия к щиту освещения на втором этаже	17,34	TM20D NSX100F	20
Линия к силовому шкафу распределительному на втором этаже	132,82	TM160D NSX160B	135
Линия к щиту освещения на третьем этаже	17,34	TM20D NSX100F	20
Линия к силовому шкафу распределительному на третьем этаже	119,77	TM125D NSX160F	125
Линия к вентиляционной установке	158,56	TM160D NSX160B	160
Линия к встроенному шкафу распределительному на первом этаже	95,28	TM100D NSX160B	100

4.4 Выбор питающей линии к трансформаторной подстанции

«Выбор сечения кабеля осуществляется по экономической плотности тока:

$$F = \frac{\sqrt{P_{\text{общ}}^2 + (Q_{\text{общ}} - Q_{\text{КУ}})^2}}{\sqrt{3} \cdot j \cdot U_n} \quad (61)$$

Экономическая плотность тока согласно [1] для алюминиевых проводников при числе часов использования максимума нагрузки от 3000 до 5000 часов составляет 1,1 А/мм²» [5].

Определим минимальное сечение питающего кабеля соединяющего трансформаторную подстанцию, от которой получают питание офисные здания, с другой подстанций в городской схеме электроснабжения:

$$F = \frac{\sqrt{837,591^2 + (641,424 - 320)^2}}{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 10} = 47,144 \text{ мм}^2.$$

На основании полученного расчётного значения выбираем кабель АВВГ 3х70.

Выводы по разделу.

Были определены расчётные токи в групповых линиях и к индивидуальным мощным электроприемникам, выполнен выбор сечений кабелей, автоматических выключателей, измерительных трансформаторов тока для установки на ТП, а также высоковольтный питающий кабель, соединяющий трансформаторную подстанцию по стороне 10 кВ с другой подстанций в системе электроснабжения города.

5 Определение токов КЗ

Основная методика по определению токов коротких замыканий описана в ГОСТ 28249 – 93. Для проведения расчётов составляем расчётную схему, на которой определяем точки, в которых будем определять токи короткого замыкания, необходимые для проверки выбранного ранее электрооборудования, коммутационных аппаратов и проводников. Для проверки аппаратов, размещаемых в распределительном устройстве 0,4 кВ, первую точку КЗ определяем на шинах 0,4 кВ, вторую точку КЗ будем рассчитывать на зажимах самого мощного электроприемника, которым является вентиляционная установка.

5.1 Определение сопротивлений, входящих в схему замещения

За базисное напряжение принимают значение напряжения на низкой стороне трансформаторной подстанции [15, 16]:

$$U_{\sigma} = 400 \text{ В}.$$

Среднее номинальное напряжение на стороне высокого напряжения трансформаторной подстанции принимаем равным:

$$U_H = 10500 \text{ В}.$$

Определяем параметры внешней системы:

Мощность КЗ в расчетах принимаем $S_K = 100 \text{ МВА}$, $U_{HH} = 10,5 \text{ кВ}$.

По заданному значению мощности короткого замыкания определяем в индуктивное сопротивление внешней системы [18]:

$$X_{cэ} = \frac{U_{HH}^2}{S_K} \cdot 10^3; \quad (62)$$

$$X_{cэ} = \frac{0,4^2}{100} \cdot 10^3 = 1,6 \text{ МОм}.$$

Параметры, выбранного в предыдущем разделе работы, силового трансформатора ТМГ-630 приведены в таблице 10, параметры автоматических выключателей в таблице 11, параметры кабельных линий в таблице 12, параметры трансформаторов тока в таблице 13.

Таблица 10 - Данные о потерях в трансформаторе ТМГ-630/10, напряжении короткого замыкания и токах холостого хода

$P_{xx}, \text{кВт}$	$P_{кз}, \text{кВт}$	K_3	$U_{кз}, \%$	$S_n, \text{кВА}$	$I_{xx}, \%$
0,94	7,6	0,70	5,5	630	1,6

Таблица 11 – Внутренние сопротивления выбранных автоматических выключателей

Выключатель	$R_{ab}, \text{МОм}$	$x_{AB}, \text{МОм}$
ВА-СЭЦ-TS400	0,65	0,17
ВА-СЭЦ-TS160	1,2	0,6

Таблица 12 - Длины кабельных линий и погонные активные и индуктивные сопротивления

Кабель	$R, \text{МОм/м}$	$x, \text{МОм/м}$	$l_{каб}, \text{м}$
АПВБбШв 4x120	0,261	0,06	65
ВВГнг-LS 5x120	0,154	0,08	50

$$R_{кл} = l \cdot R; \quad (63)$$

$$x_{кл} = l \cdot x; \quad (64)$$

$$R_{кл1} = 0,261 \cdot 65 = 16,96 \text{ МОм};$$

$$R_{кл2} = 0,154 \cdot 50 = 7,7 \text{ МОм};$$

$$x_{кл1} = 0,06 \cdot 65 = 3,9 \text{ МОм};$$

$$x_{кл2} = 0,08 \cdot 50 = 4 \text{ МОм}.$$

Таблица 13 - Сопротивление катушек, выбранных ТТ

Трансформатор тока	$R, \text{ мОм}$	$x, \text{ мОм}$
ТШЛ-СЭЦ-0,66 500/5	0,05	0,07

Внутреннее сопротивление измерительных трансформаторов тока на стороне высокого напряжения трансформаторной подстанции в расчётах не учитывается.

На рисунке 2 представлена расчётная схема, в которую вошли все основные элементы системы электроснабжения и на которой отмечены расчётные точки в которых будут определяться токи короткого замыкания.

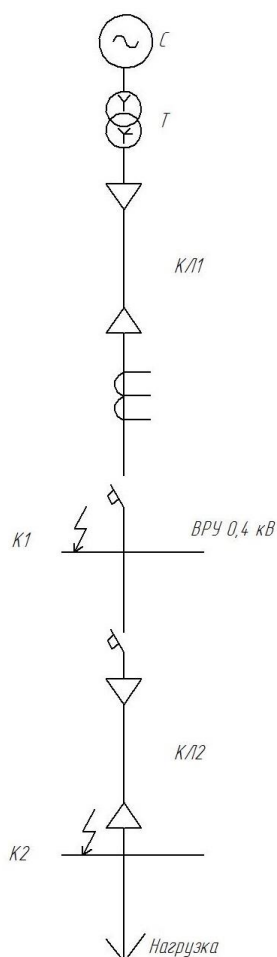


Рисунок 2 – Расчетная схема, в которую вошли все основные элементы системы электроснабжения

На рисунке 3 приведена схема замещения, в которой элементы системы электроснабжения заменены на собственные активные и индуктивные сопротивления.

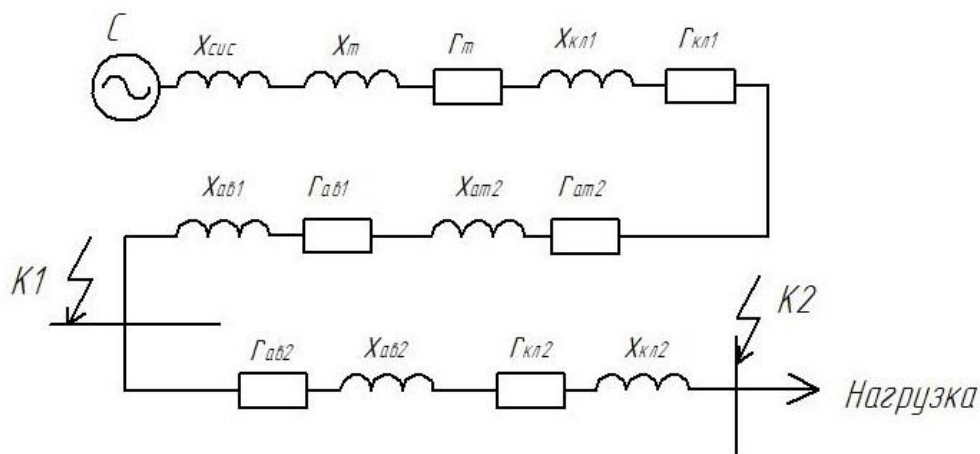


Рисунок 3 – Схема замещения, в которой элементы системы электроснабжения заменены на собственные активные и индуктивные сопротивления

5.2 Определение токов короткого замыкания в расчётных точках

«Рассчитаем ток короткого замыкания для точки К1. По схеме замещения прямой последовательности суммарные сопротивления $R_{1\Sigma}$, $x_{1\Sigma}$ определяем арифметическим суммированием сопротивлений до точки короткого замыкания» [20]:

$$R_{1\Sigma} = 3 + 16,96 + 0,05 + 0,65 + 1,2 = 21,86 \text{ мОм};$$

$$x_{1\Sigma} = 1,6 + 3,9 + 14 + 0,07 + 0,17 + 0,6 = 20,34 \text{ мОм};$$

«Определим полное суммарное сопротивление до т. К1» [22]:

$$Z_{1\Sigma}^{(3)} = \sqrt{21,86^2 + 20,34^2} = 29,859 \text{ мОм}.$$

«Найдем ток трехфазного металлического КЗ» [24]:

$$I_{KM}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 29,859} = 7,74 \text{ кА.}$$

Определяем значение ударного тока короткого замыкания с помощью ударного коэффициента:

$$i_{y\delta.K1} = \sqrt{2} \cdot K_{y\delta.K1} \cdot I_{K1}^{(3)} \quad (65)$$

где « $K_{y\delta}$ – ударный коэффициент» [21].

Для определения ударного коэффициента, находим соотношение суммарного индуктивного сопротивления до точки КЗ к суммарному активному [25]:

$$\frac{x_{\Sigma}^{(3)}}{R_{\Sigma}^{(3)}} = \frac{20,34}{21,86} = 0,93.$$

По графику определяем, что при данном соотношении, значение ударного коэффициента составит 1.

Тогда амплитудное значение ударного тока:

$$i_{y\delta.K1} = \sqrt{2} \cdot 1 \cdot 7,74 = 10,94 \text{ кА.}$$

«Рассчитаем ток короткого замыкания для точки К2. по схеме замещения прямой последовательности суммарные сопротивления $R_{2\Sigma}$, $X_{2\Sigma}$ определяем арифметическим суммированием сопротивлений до точки короткого замыкания» [6]:

$$R_{2\Sigma} = 3 + 16,96 + 0,05 + 0,65 + 1,2 + 7,7 = 29,56 \text{ мОм;}$$

$$x_{2\Sigma} = 1,6 + 3,9 + 14 + 0,07 + 0,17 + 0,6 + 4 = 24,34 \text{ мОм};$$

«Определим полное суммарное сопротивление до т. К2» [6]:

$$Z_{2\Sigma}^{(3)} = \sqrt{29,56^2 + 24,34^2} = 38,29 \text{ мОм}.$$

«Найдем ток трехфазного металлического КЗ» [23]:

$$I_{KM}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 38,29} = 6,03 \text{ кА}.$$

Для определения ударного коэффициента, находим соотношение суммарного индуктивного сопротивления до точки КЗ к суммарному активному:

$$\frac{x_{\Sigma}^{(3)}}{R_{\Sigma}^{(3)}} = \frac{24,34}{29,56} = 0,82.$$

По графику определяем, что при данном соотношении, значение ударного коэффициента составит 1.

Тогда амплитудное значение ударного тока:

$$i_{y\partial.K1} = \sqrt{2} \cdot 1 \cdot 6,03 = 8,5 \text{ кА}.$$

Полученные в результате расчётов токи трёхфазного короткого замыкания и амплитудного значения ударного тока в двух точках сводим в таблицу 14.

Таблица 14 – Токи трёхфазного короткого замыкания и амплитудного значения ударного тока в двух точках

Расчётные точки короткого замыкания	$I_{KM}^{(3)}, \text{кА}$	$i_{yo}, \text{кА}$
К1	7,74	10,94
К2	6,03	8,5

Выводы по разделу.

Выполнены расчёты по определению токов короткого замыкания в двух точках системы электроснабжения. Для выполнения расчётов были определены сопротивления элементов, входящих в расчётную схему и составленную на её основе схему замещения, к таким элементам относились выбранные ранее на трансформаторной подстанции силовые трансформаторы, автоматические выключатели, соединительные кабельные линии, измерительные трансформаторы тока. Для 2 точек определены максимальные значения металлического трехфазного тока короткого замыкания и ударного значения тока КЗ. По полученным значениям были проверены выбранные ранее коммутационные аппараты. Коммутационная способность выбранных аппаратов превышает расчётные значения токов КЗ, следовательно, аппараты выбраны верно.

6 Выбор параметров защиты силовых трансформаторов, установленных на КТП

«Требуется установить релейную защиту от токов короткого замыкания и от токов перегрузки, поэтому принимается токовая отсечка и максимальная токовая защита на стороне высшего напряжения. На низшей стороне сеть с глухозаземленной нейтралью, 4-проводная, поэтому все виды защит обеспечивают автоматические выключатели. Так как трансформатор масляный, то также устанавливается газовое реле РГЧЗ-66» [7].

6.1 Определение сопротивлений элементов

Параметры питающей линии выполненной кабелем от главной понизительной подстанции энергосистемы до ТП, питающей здания:

$$l = 5000 \text{ м};$$

$$K_{y\partial 1} = 0,000447 \text{ Ом / м};$$

$$X_{y\partial 1} = 0,000082 \text{ Ом / м}.$$

«Определим значение сопротивления КЛ от системы до цехового СТ» [7]:

$$R_{кл} = l \cdot R; \quad (66)$$

$$x_{кл} = l \cdot x; \quad (67)$$

$$Z_{кл} = \sqrt{R_{кл}^2 + x_{кл}^2}; \quad (68)$$

$$R_{кл} = 0,000447 \cdot 5000 = 2,235 \text{ Ом};$$

$$x_{кл} = 0,000082 \cdot 5000 = 0,41 \text{ Ом};$$

$$Z_{кл} = \sqrt{2,235^2 + 0,41^2} = 2,272 \text{ Ом}.$$

Параметры выбранного ранее силового трансформатора:

$$S_H = 630 \text{ кВа};$$

$$U_{hh} = 10,5 \text{ кВ}; U_{nn} = 0,4 \text{ кВ};$$

$$U_K = 5,5 \text{ \%}.$$

Находим полное сопротивление силового трансформатора, используя данные о напряжении короткого замыкания, номинальном напряжении и номинальной мощности силового трансформатора [7]:

$$Z_m = \frac{U_{кз} \cdot U_n^2}{S_{ном.м} \cdot 100}; \quad (69)$$

$$Z_m = \frac{5,5 \cdot 10000^2}{396900 \cdot 100} = 13,85 \text{ Ом}.$$

6.2 Определение величины токов КЗ

«Определим ток КЗ на шинах ТП на стороне 10 кВ» [6]:

$$Z_{\Sigma 1} = Z_{кл} = 2,272 \text{ Ом};$$

$$I_{кз1} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}}; \quad (70)$$

$$I_{кз1} = \frac{10500}{\sqrt{3} \cdot 2,272} = 2668 \text{ А}.$$

Находим суммарное сопротивление до точки, находящейся за силовым трансформатором, на стороне низкого напряжения:

$$Z_{\Sigma 2} = Z_{кл} + Z_m; \quad (71)$$

$$Z_{\Sigma 2} = 2,272 + 13,85 = 16,122.$$

6.3 Расчет уставок МТО

Определим значение номинального тока силового трансформатора на

стороне высокого напряжения:

$$I_{ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}; \quad (72)$$

$$I_{ном} = \frac{630}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 34 \text{ A.}$$

«Найдем ток срабатывания мгновенной токовой отсечки от БНТ» [6]:

$$I_{co} = 4 \cdot I_{ном}; \quad (73)$$

$$I_{co} = 4 \cdot 36 = 136 \text{ A.}$$

«Определим ток срабатывания мгновенной токовой отсечки от КЗ в конце линии» [6]:

$$I_{co} = 1,5 \cdot I_{кз2}; \quad (74)$$

$$I_{co} = 1,5 \cdot 376 = 564 \text{ A.}$$

Ток срабатывания принимаемый равным 1 кА.

Находим значение коэффициента чувствительности [6]:

$$K_{чувств.} = \frac{I_{кз1}}{I_{co}}; \quad (75)$$

$$K_{чувств.} = \frac{2668}{1000} = 2,668.$$

Поскольку расчётное значение коэффициента превышает 2, то уставки защиты выбранный верно и обеспечиваются условия для надежного срабатывания защиты во всех режимах работы силового трансформатора.

6.4 Определение уставок МТЗ силового трансформатора

Находим значение тока срабатывания максимальной токовой защиты силового трансформатора по формуле:

$$I_{сз} = \frac{k_{сзн} \cdot k_{отс} \cdot I_{ном}}{k_{в}}; \quad (76)$$

где « $k_{отс}$ - коэффициент отсечки» [8];

$$I_{сз} = \frac{1,2 \cdot 1,3}{0,8} \cdot 34 = 66,3 \text{ А.}$$

Исходя из расчётного значения тока выбираем ток срабатывания максимальной токовой защиты равным 120 А, при времени выдержки 0,4 с.

«Определим значение коэффициента чувствительности МТЗ» [8]:

$$K_{чувств.} = \frac{I_{кз2} \cdot 0,865}{I_{сз}}; \quad (77)$$

$$K_{чувств.} = \frac{376 \cdot 0,865}{66,3} = 4,9.$$

Поскольку найденное значение коэффициента чувствительности превышает пороговое значение 2, то это говорит о правильности выбора характеристик и надежности срабатывания защиты.

6.5 Выбор терминала микропроцессорной защиты

«К установке принимается микропроцессорное реле серии SEPAM 1000+ T20 (защита трансформатора), Sepam 1000+ - это простая и надежная серия цифровых устройств защиты и измерения, предназначенная для использования в распределительных и промышленных сетях среднего

напряжения.

Цифровые терминалы серии SEPAM 1000+ обладают всеми стандартными функциями микропроцессорных защит: измерением, релейной защитой, системной автоматикой, самодиагностикой, диагностикой работы коммутационного аппарата и сети, цифровым осциллографированием и имеют связь с системой АСУ по интерфейсу RS-485 с открытым протоколом MODBUS.

Sepam 1000+ открывает новые возможности в части расширения функций простым добавлением модулей и в части интеграции в любую систему диспетчерского управления.

Sepam 2000 заменяет такие измерительные приборы, как амперметры, вольтметры, ваттметры, счетчики энергии, приборы измерения температуры и качества электроэнергии. Большая часть информации об измеренных величинах может быть выведена на дисплей устройства Sepam. Полная информация, включая результаты измерений, выводимые на дисплей, и дополнительные результаты измерений могут быть выведены на пульт TSM. Указанный переносной пульт предназначен для считывания информации и осуществления регулировки защит. Доступ к регулировке защищен паролем.

Данные устройства имеют модульную конструкцию и программное формирование защит. Использование таких устройств защиты, адаптированных к каждому виду применения, позволяет получить оптимальное соотношение «цена/качество».

В устройстве предусмотрена возможность программирования логики управления, что позволяет обходиться без внешних дополнительных реле» [8].

Выводы по разделу.

Определение уставки срабатывания максимальной токовой отсечки и максимальной токовой защиты силовых трансформаторов, установленных на комплектной трансформаторной подстанции. Защиты выполнены на базе микропроцессорных устройств SEPAM 1000+.

Заключение

Цель выпускной квалификационной работы заключалась в разработке элементов проекта системы электроснабжения здания организации по выполнению опытно-конструкторских работ, направленных на повышение надежности электроснабжения потребителей и снижение издержек во время её эксплуатации.

Дана краткая характеристика рассматриваемой в работе организации по выполнению опытно-конструкторских работ, перечислены виды деятельности организации, области научных интересов и ведущееся разработки. Приводятся характеристики капитальных строений, параметры внешней и внутренней системы электроснабжения, а также категории по надежности электроснабжения потребителей.

По методу расчётного коэффициента определены суммарные нагрузки, потребляемые силовыми электроприемниками двух зданий. В программе Dialux выполнены расчёты требуемого количества светильников и потребляемой ими мощности для каждого из помещений на всех трёх этажах каждого из зданий, определены суммарные значения мощности и тока, протекающего по линиям от трансформаторной подстанции до здания организации.

Определена необходимая номинальная мощность силовых трансформаторов для установки на КТП. По условию надежности электроснабжения электроприемников организации, для установки выбрано два силовых трансформатора для того, чтобы коэффициент загрузки в нормальном режиме работы не превышал допустимое для данных категорий по надежности электроснабжения значений, мощность силовых трансформаторов не должна быть ниже 630 кВА. Произведено технико-экономическое сравнение установки на КТП трансформаторов различной мощности, при этом определена необходимая мощность устройств компенсации. Наиболее экономичным вариантом, как с точки зрения

приведённых затрат на установку основного оборудования КПП, так и с точки зрения потерь электрической энергии стал вариант с установкой на КТП двух трансформаторов ТМГ-630 и 2 автоматизированных конденсаторных установок мощностью по 160 квар каждая.

Были определены расчётные токи в групповых линиях и к индивидуальным мощным электроприемникам, выполнен выбор сечений кабелей, автоматических выключателей, измерительных трансформаторов тока для установки на ТП, а также высоковольтный питающий кабель, соединяющий трансформаторную подстанцию по стороне 10 кВ с другой подстанций в системе электроснабжения города.

Выполнены расчёты по определению токов короткого замыкания в двух точках системы электроснабжения. Для выполнения расчётов были определены сопротивления элементов, входящих в расчётную схему и составленную на её основе схему замещения, к таким элементам относились выбранные ранее на трансформаторной подстанции силовые трансформаторы, автоматические выключатели, соединительные кабельные линии, измерительные трансформаторы тока. Для 2 точек определены максимальные значения металлического трехфазного тока короткого замыкания и ударного значения тока КЗ. По полученным значениям были проверены выбранные ранее коммутационные аппараты. Коммутационная способность выбранных аппаратов превышает расчётные значения токов КЗ, следовательно, аппараты выбраны верно.

Определение уставки срабатывания максимальной токовой отсечки и максимальной токовой защиты силовых трансформаторов, установленных на комплектной трансформаторной подстанции. Защиты выполнены на базе микропроцессорных устройств SEPAM 1000+.

Список используемых источников

1. Акимова Н.А., Котеленец Н.Ф., Сентюрихин Н.И. Монтаж, техническая эксплуатация и ремонт электрического и электромеханического оборудования: Учеб, пособие для сред. проф. образования. 2-е изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2014. 296 с.
2. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: Учебник для вузов. 5-е изд., стер. М.: Высш, шк., 2017. 639 с.: ил.
3. Вахнина В.В. Компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий : учебное пособие. Тольятти : ТГУ, 2016. 69 с.
4. Вахнина В.В. Проектирование систем электроснабжения машиностроительных предприятий : учебное пособие. Тольятти : ТГУ, 2014. 67 с.
5. Вахнина В.В., Черненко А.Н. Проектирование систем электроснабжения [Электронный ресурс]: электронное учеб.-метод. пособие. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2016. 78 с. URL: https://dSPACE.tltsu.ru/bitstream/123456789/2976/1/Vahnina%20Chernenko_EUMI_Z.pdf (дата обращения: 15.12.2021).
6. Вахнина В.В., Черненко А.Н. Проектирование системы электроснабжения цеха предприятия: методические указания по курсовому проектированию. Тольятти: ТГУ, 2008. 80 с.
7. Вахнина В.В., Черненко А.Н. Системы электроснабжения [Электронный ресурс]: электронное учеб.-метод. пособие. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2015. 46 с. URL: https://dSPACE.tltsu.ru/bitstream/123456789/2943/1/Vahnina%20Chernenko_EUMI_Z.pdf (дата обращения: 18.02.2022).
8. Вахнина В.В., Черненко А.Н., Самолина О.В., Рыбалко Т.А. Проектирование осветительных установок [Электронный ресурс]:

электронное учеб.-метод. пособие. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2015. 107 с. URL: https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/3383/1/Vahnina%20Chernenko%20Samolina%20Ribalko_%20EUI_Z.pdf (дата обращения: 18.02.2022).

9. Городецкий С. А. Монтаж силовых трансформаторов напряжением до 110 кВ. М. : Энергия, 2012. 79 с.

10. Гужов Н.П., Ольховский В.Я., Павлюченко Д.А. Системы электроснабжения: учебник. Ростов н/Д : Феникс, 2011. 382 с. : ил.

11. Карпов Ф.Ф. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях. М.: Энергия, 2015. 184 с.

12. Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 марта 2007 г. М.: КНОРУС, 2017. 488 с.

13. Релейная защита электроэнергетических систем : Учебное пособие / Под ред. А.Ф. Дьякова. 2-е изд., стереот. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. 296 с., ил.

14. Рожин А.В., Бакшаева Н.С. Внутрицеховое электроснабжение. Учебное пособие. Киров: Изд-во ВятГУ, 2016. 258 с.

15. Сазонова Т.В., Шлейников В.Б. Электроснабжение силовых электроприемников цеха промышленного предприятия: учебное пособие. М.: Бибком, 2016. 110 с.

16. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение промышленных и гражданских зданий [Электронный ресурс]: учебник. 5-е изд., перераб. и доп. М. : ИНФРА-М, 2019. 405 с. URL: <http://znanium.com/catalog/product/1003810> (дата обращения: 05.01.2022).

17. Соколов Б. А., Соколова Н. Б. Монтаж электрических установок. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Энергоатомиздат, 2018. 592 с. :

18. Шеховцов В.П. Расчет и проектирование ОУ и электроустановок промышленных механизмов [Электронный ресурс]: Учебное пособие. 2-е изд. М.:Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2015. 352 с. URL: <http://znanium.com/catalog/product/494251> (дата обращения 14.12.2021).

19. Шлыков С.В., Шаповалов В.А., Шаповалова Н.А. Потребители электрической энергии: учеб, пособие. ТГУ. Тольятти: ТГУ, 2011. 91с.
20. Щербаков Е.Ф., Александров Д.С., Дубов А.Л. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях: учебное пособие. М.: Форум, 2019. 496 с.
21. Электрооборудование жилых зданий / 4-е изд., стер. М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2017. 256 с.
22. Chapman S.J. Instructor's Manual to accompany Electric Machinery and Power System Fundamentals, Second Edition. USA: McGraw-Hill, 2011. 307 p.
23. Kuffel E., Zaengl W.S., Kuffel J. High Voltage Engineering. Fundamentals. Oxford: Newnes, 2014. 539 p.
24. Rajan R., Fernandez F.M. Power control strategy of photovoltaic plants for frequency regulation in a hybrid power system // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2019. №110. pp. 171-183.
25. Rajendra P. Fundamentals of electrical engineering. - PHI Learning Pvt. Ltd., 2014. 1064 p.
26. Sahdev S.K. Basic Electrical Engineering. Pearson India, 2015. 768 p.