

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 электрической части понизительной подстанции 6/0,4 кВ  
«Объединённого института ядерных исследований»

Обучающийся

А. А. Феоктистов

(И. О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

А.А. Андреев

(ученая степень, звание, И. О. Фамилия)

Тольятти 2023

## Аннотация

«Объединенный институт ядерных исследований – международная межправительственная организация, созданная на основе Соглашения, подписанного одиннадцатью странами-учредителями 26 марта 1956 г. и зарегистрированная ООН 1 февраля 1957 г. Это всемирно известный научный центр, являющий собой уникальный пример успешной интеграции фундаментальных теоретических и экспериментальных исследований с разработкой и применением новейших технологий и университетским образованием» [9]. Последние шесть элементов седьмого периода таблицы Менделеева – 113, 114, 115, 116, 117, 118 – были синтезированы в Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ) на ускорительном комплексе У-400 в лаборатории ядерных реакций имени Георгия Флёрва. И для этих научных изысканий требуется осуществление качественного электроснабжения.

Электроснабжение корпуса 1А, где задаются циклы на установку Бустера и Нуклотрона, обеспечивается понизительной подстанцией ТП-6/0,4 кВ. В настоящий момент электрооборудование данной подстанции является морально и физически устаревшим. Существующая схема на стороне 6 кВ не удовлетворяет требованиям надежности потребителей первой и второй категорий. Поэтому целью работы является реконструкция электрической части распределительного устройства 6 кВ подстанции 6/0,4 кВ «Объединённого института ядерных исследований». Задачами данной работы является расчёт и выбор силовых трансформаторов, расчёт и выбор основного электрооборудования подстанции, расчет релейной защиты терминалов Сириус-Т производства ЗАО «Радиус-Автоматика».

Данная ВКР содержит пояснительную записку объемом 55 страниц дополняемой 12 таблицами, 5 рисунками, а также 6 чертежами формата А1.

## Содержание

|   |     |
|---|-----|
| Введение.....   | 4   |
| 1 Анализ исходных данных.....   | 5   |
| 1.1 Исходная схема и оборудование подстанции .....                      | 5   |
| 1.2 Обоснование мероприятий по реконструкции подстанции .....           | 8   |
| 2 Реконструкция электрической части подстанции .....                    | 133 |
| 2.1 Определение расчётных электрических нагрузок подстанции.....        | 133 |
| 2.2 Проверка силовых трансформаторов по перегрузочной способности. .... | 17  |
| 2.3 Выбор типа и компоновки трансформаторной подстанции.....            | 200 |
| 2.4 Выбор и проверка проводников .....                                  | 222 |
| 2.5 Расчёт токов короткого замыкания .....                              | 27  |
| 2.6 Выбор и проверка электрических аппаратов .....                      | 34  |
| 3 Релейная защита и автоматика реконструированной подстанции.....       | 43  |
| 3.1 Выбор блоков релейной защиты и автоматики .....                     | 43  |
| 3.2 Выбор уставок релейной защиты и автоматики блоков РЗиА.....         | 46  |
| 4 Требования к надёжности электроснабжения и качеству электроэнергии..  | 48  |
| 5 Перечень мероприятий по заземлению (занулению) и молниезащите. ....   | 49  |
| Заключение .....  | 51  |
| Список используемых источников.....                                     | 54  |

## Введение

В настоящий момент электрическая энергия является неотъемлемой частью жизни современного человека.

Развитие промышленности способствует росту потребления электричества, увеличению мощностей агрегатов, механизмов, что в последующем влечёт за собой модернизацию и реконструкцию оборудования. В связи с этим, реконструкция и техническое перевооружение изношенного и морально устаревшего оборудования «Объединённого института ядерных исследований» рассматривается как приоритетное направление. В настоящее время этой задачей занимается АО «Штрабаг» и проектная организация «Комета».

Объектом исследования в работе является понизительная подстанция 6/0,4 кВ «Объединённого института ядерных исследований».

Предметом исследования является электрическая часть понизительной подстанции 6/0,4 кВ «Объединённого института ядерных исследований».

Целью данной работы является реконструкция понизительной подстанции 6/0,4 кВ «Объединённого института ядерных исследований». Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- аналитический обзор исходной схемы электрических соединений и оборудования понизительной подстанции 6/0,4 кВ «Объединённого института ядерных исследований»;
- разработка схемы питания 6/0,4 кВ «Объединённого института ядерных исследований» от РП-6 кВ;
- расчёт и выбор силовых трансформаторов;
- расчет токов короткого замыкания;
- расчёт и выбор основного электрооборудования подстанции;
- расчет релейной защиты 6/0,4 кВ «Объединённого института ядерных исследований» и её замена на терминалы Сириус-Т производства ЗАО «Радиус-Автоматика».

## **1 Анализ исходных данных**

### **1.1 Исходная схема и оборудование подстанции**

На первом этапе, в работе необходимо провести аналитический обзор исходной схемы электрических соединений и оборудования понизительной подстанции ТП-6/0,4 кВ «Объединённого института ядерных исследований».

Рассматриваемая понизительная подстанция переменного тока ТП-6/0,4 кВ является одной из потребительских подстанций «Объединённого института ядерных исследований», которая обеспечивает электроснабжение исключительно данной организации. Данная подстанция ТП-6/0,4 территориально расположена в наукограде Дубна, находящемся в Московской области Российской Федерации. Учредителями «Объединённого института ядерных исследований» являются 18 государств-членов, поэтому электроснабжению данного объекта уделяется особое внимание.

«Питающая подстанция ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» является двухтрансформаторной подстанцией тупикового типа с кабельными вводами и резервированием на стороне 0,4 кВ (НН)» [9]. Питание данной подстанции 6/0,4 кВ осуществляется одной линией электропередачи с применением силового кабеля марки АСБл-10 (3×120) по магистральной схеме, к которой подключены ещё несколько аналогичных понизительных подстанций 6/0,4 кВ «Объединённого института ядерных исследований».

Существующая электрическая схема не отвечает требованиям надёжности для потребителей первой и второй категорий электроснабжения [20]. Поэтому необходимо рассмотреть новую схему электрических соединений нормального режима для реконструируемой подстанции.

Распределительное устройство 6 кВ ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» представляет собой закрытое распредустройство, выполненное в виде двухэтажного здания. Оно было введено в эксплуатацию в 1978 году. Из основного оборудования, в РУ-6 кВ установлены устаревшие и технически изношенные ячейки

одностороннего обслуживания типа КСО-366. В этих ячейках находятся выключатели высокого напряжения марки ВМГ-133, а также разъединители РВ-6, которые были установлены в ячейках вместе с их вводом в эксплуатацию (1978 год).

Следующими основными элементами на ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» являются силовые трансформаторы, понижающие напряжение с 6 кВ до 0,4 кВ. В исходной схеме подстанции установлены два силовых трансформатора марки ТМГ-630/6. Эти трансформаторы были введены в работу на подстанции в 2012 году и на начало 2023 года они находятся в технически исправном состоянии. Данный тип трансформатора зарекомендовал себя значительно лучше, чем аналогичные трансформаторы марок ТМ и ТМЗ. Таким образом, установлено, что силовые трансформаторы ТМГ-630/6, установленные на объекте исследования, не требуют замены. В работе они проверяются на условия перегрузочной аварийной способности с учётом реконструкции схемы подстанции.

«Распределительное устройство номинальным напряжением 0,4 кВ (РУ-0,4 кВ) ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» конструктивно выполнено комплектным с применением ячеек стационарного типа, которые выбираются в зависимости от применяемого оборудования» [9]. Защита и коммутация схемы РУ-0,4 кВ подстанции обеспечивается автоматическими выключателями, установленными в шкафах РУ-0,4 кВ ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ». Все автоматы в схеме были установлены в результате модернизации сети 0,4 кВ на ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» в 2012 году. Поэтому они не требуют замены. «Таким образом существующая схема на стороне 0,4 кВ подстанции полностью соответствует условиям надежности электроснабжения потребителей первой и второй категорий потребителей» [10].

От ТП-6/0,4 кВ по радиальной схеме и посредством двух кабельных линий подключено вводное распределительное устройство (ВРУ) «ОИЯИ». Подобные устройства формируют характер нагрузки подстанции, поэтому их необходимо учитывать при проектировании. От ВРУ электрическая энергия

распределяется между щитами распределительными (ЩР) и щитами осветительными (ЩО). От данных щитов получают питание конечные электроприёмники объекта по смешанной схеме электроснабжения. При этом электрическая силовая нагрузка объекта распределена на секции сборных шин РУ-0,4 кВ ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» относительно равномерно. Также разделено питание рабочего и аварийного освещения объекта. Их щитки питаются от разных трансформаторов ТП-6/0,4 кВ, что повышает уровень надёжности.

Технические данные нагрузки потребителей подстанции ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические данные нагрузки потребителей ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ»

| Номер ЩР (ЩО)              | Характеристика ЩР (ЩО)        | $P_{ном}$ , кВт |
|----------------------------|-------------------------------|-----------------|
| I секция шин               |                               |                 |
| ЩР-1                       | Силовой распределительный щит | 8,50            |
| ЩР-2                       | Силовой распределительный щит | 8,20            |
| ЩР-3                       | Силовой распределительный щит | 46,86           |
| ЩР-4                       | Силовой распределительный щит | 9,10            |
| ЩР-5                       | Силовой распределительный щит | 109,60          |
| ЩР-6                       | Силовой распределительный щит | 10,50           |
| ЩР-7                       | Силовой распределительный щит | 0,35            |
| ЩР-8                       | Силовой распределительный щит | 7,00            |
| ЩР-9                       | Силовой распределительный щит | 220,50          |
| ЩР-10                      | Силовой распределительный щит | 0,14            |
| ЩР-11                      | Силовой распределительный щит | 10,85           |
| ЩР-12                      | Силовой распределительный щит | 32,00           |
| ЩО-1                       | Внутреннее рабочее освещение  | 43,34           |
| ЩО-2                       | Наружное рабочее освещение    | 3,60            |
| Всего электроосвещение     |                               | 46,94           |
| Всего силовое оборудование |                               | 463,60          |
| Итого секция I             |                               | 510,54          |
| II секция шин              |                               |                 |
| ЩР-13                      | Силовой распределительный щит | 195,71          |
| ЩР-14                      | Силовой распределительный щит | 251,70          |
| ЩР-15                      | Силовой распределительный щит | 54,00           |
| ЩР-16                      | Силовой распределительный щит | 300,00          |
| ЩО-3                       | Аварийное освещение           | 4,7             |
| ЩО-4                       | Наружное аварийное освещение  | 0,5             |
| Всего электроосвещение     |                               | 5,2             |
| Всего силовое оборудование |                               | 801,41          |
| Итого секция II            |                               | 806,61          |
| Итого по секциям I и II    |                               | 1317,15         |

Исходные номинальные нагрузки силовой и осветительной сети, указанные в таблице 1, являются основанием для расчёта нагрузок подстанции и выбора оборудования.

## **1.2 Обоснование мероприятий по реконструкции подстанции**

Обоснование и разработка предложений по реконструкции объекта исследования производится на основе нормативных положений и с учетом проведенного ранее анализа.

Известно, что к современным трансформаторным понизительным подстанциям предъявляются жёсткие требования по следующим техническим критериям, а именно:

- условия надёжности питания потребителей соответствующих категорий, согласно [7];
- принцип бесперебойности передачи электроэнергии потребителям соответствующих категорий надёжности, согласно принятых схем нормальных режимов;
- нормы электробезопасности при выполнении электромонтажных, ремонтных работ и работ по обслуживанию и осмотру всего оборудования подстанций;
- применение резервирования на всех ответственных участках распределительной, питающей сети и потребителей подстанции, отказ от системы «холодного» резерва;
- применение секционирования на всех звеньях электрической сети в распределительных устройствах подстанции;
- применение стандартных разработанных схем распределительных устройств и подстанций, в которых изменения должны быть обоснованы только расчётным технико-экономическим путём;
- обеспечение коммутационной способности оборудования распределительных устройств подстанции;



- обеспечение динамической устойчивости системы, которая проверяется соответствующими расчётами и моделированием всей системы электроснабжения объекта;
- обеспечение транзита и резерва мощностей для питания других объектов (применяется для узловых и транзитных подстанций);
- соблюдение баланса мощностей во всех режимах, включая баланс по реактивной мощности и при необходимости применение компенсирующих устройств реактивной мощности;
- обеспечение защиты всех важнейших узлов и ветвей цепи подстанции, а также важнейшего оборудования, для чего применяются аппараты защиты с установленными на их приводах устройствами релейной защиты;
- использование термически устойчивого оборудования, способного выдерживать длительные сквозные токи короткого замыкания;
- автоматизация силового, контрольного, измерительного оборудования путём внедрения средств и устройств автоматики в схемы нормальных режимов подстанций;
- применение современных средств автоматизации на всех уровнях и звеньях подстанций: телеизмерений, автоматизированных систем учёта и контроля электроэнергии, автоматизированных систем управления режимами, систем управления электроснабжением подстанций;
- ремонтпригодность всего оборудования схемы нормальных соединений подстанции;
- возможность дальнейшего расширения, модернизации и реконструкции схемы главных соединений распределительных устройств подстанций;
- применение блочных конструкций;
- использование современного оборудования распределительных устройств подстанций (приоритет отдаётся устройствам с элегазовой

и вакуумной изоляцией);

- минимальные стоимости эксплуатации и ремонта при максимальном технико-экономическом эффекте.

Таким образом, в результате проведения анализа исходных технических данных схемы нормальных соединений и состояния основного оборудования на ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ», было установлено следующее:

- реконструкцию схемы электрических соединений ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» предлагается осуществить путём внесения качественных изменений в схему соединений РУ-6 кВ подстанции. При этом предложено принять новую схему питания ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» от РП-6 кВ: радиальная схема с резервированием на высшем и низшем напряжениях. На высшем напряжении (6 кВ) резервирование будет осуществляться на РП-6 кВ на секционном выключателе с АВР (автоматический ввод резерва), а на стороне низшего напряжения подстанции эту функцию будет осуществлять секционный автоматический выключатель;
- предложенную модернизацию ячеек РУ-6 кВ ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ», осуществляемую с заменой устаревшего основного оборудования, планируется внедрить вместе с реконструкцией схемы электрических соединений подстанции. Таким образом, в работе предложено заменить неэффективные, ненадёжные и старые ячейки типа КСО-366 с оборудованием 6 кВ на современные ячейки типа КРУ внутренней установки (ячейки марки D-12P).

«Внедрение принятых схемных решений и рекомендаций по реконструкции и модернизации системы электроснабжения ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» позволит значительно повысить надёжность, экономичность, электробезопасность и экологичность на объекте исследования, при этом значительно снизив затраты времени и финансовую составляющую на монтаж, обслуживание, технические осмотры, дефектацию и ремонт данного оборудования» [2].

Далее в работе необходимо расчётным путём подтвердить предложенные схемные технические решения, для чего следует провести выбор и проверку её основных элементов – силовых трансформаторов, проводников и электрических аппаратов. Для подтверждения работоспособности реконструированной схемы электрических соединений, а также комплексного обоснования принятых решений по модернизации основного оборудования ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ», также предлагается:

- проверить целесообразность установки на подстанции силовых трансформаторов принятых марок по их нагрузочной способности в нормальном режиме работы и по допустимой перегрузке в послеаварийном режиме работы с учётом резервирования схемы;
- проверочным путём обосновать целесообразность применения на ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» проводников питающей и распределительной сетей.

Таким образом в работе необходимо решить комплексную задачу по внедрению предложенных мероприятий по реконструкции схемы главных электрических соединений нормального режима и модернизации оборудования ТП-6/0,4 кВ с учётом приведённых дополнительных аспектов.

Выводы по разделу 1.

В работе было приведено описание и анализ исходной схемы электрических соединений ТП-6/0,4 кВ с анализом технических данных нагрузки потребителей.

В результате проведения анализа исходных технических данных схемы нормальных соединений и состояния основного оборудования на ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» было установлено и обосновано следующее:

- реконструкцию схемы электрических соединений ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» предлагается осуществить путём внесения качественных изменений в схему соединений РУ-6 кВ подстанции. При этом предложено принять новую схему питания ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» от РП-6 кВ: радиальная схема с резервированием на высшем и низшем напряжениях. На высшем напряжении (6 кВ) резервирование будет

осуществляться на РП-6 кВ на секционном выключателе с АВР (автоматический ввод резерва), а на стороне низшего напряжения подстанции эту функцию будет осуществлять секционный автоматический выключатель. Такая схема будет удовлетворять требованиям надежности электроснабжения потребителей первой и второй категорий;

- предложенную модернизацию ячеек РУ-6 кВ ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ», осуществляемую с заменой устаревшего основного оборудования, планируется внедрить вместе с реконструкцией схемы электрических соединений подстанции. Таким образом, в работе предложено заменить ненадёжные и устаревшие ячейки типа КСО-366 с оборудованием 6 кВ на современные ячейки типа КРУ внутренней установки (ячейки марки D-12P).

## 2 Реконструкция электрической части подстанции

### 2.1 Определение расчётных электрических нагрузок подстанции

Известно, что расчётные электрические нагрузки объектов энергетики являются основой для проектирования и реконструкции систем электроснабжения. Поэтому далее в работе, для достижения поставленной цели, следует провести расчёт электрических нагрузок, которые будут использованы для последующего выбора и проверки силовых трансформаторов, проводников линий, сборных шин, а также нового основного оборудования электрической части ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ».

В работе расчёту подлежат значения активной, реактивной и полной расчётной мощности для одиночных присоединений потребителей подстанции, систем сборных шин, а также всей подстанции ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ». Как известно, расчётный ток нагрузки нормального режима также относится к электрическим нагрузкам, поэтому в работе он также подлежит определению. Расчет нагрузок производится для распределительных щитов силовой и осветительной сети согласно принятой проектной схемы и технологическому процессу. При этом в качестве нагрузки ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» принимаются фактические максимальные значения потребляемой активной мощности распределительных щитов (силовых и осветительных), получающих питание от ВРУ-0,4 кВ данной организации.

В работе указанные расчетные нагрузки определяется методом коэффициента спроса [7]. Расчёты проводятся по принятой методике с использованием табличных коэффициентов спроса потребителей [12].

Активная расчётная мощность одиночных присоединений потребителей электрической части ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» [11]:

$$P_{np} = K_c \cdot P_{м.}, \text{ кВт}, \quad (1)$$

где  $P_m$  – максимальная активная мощность присоединений потребителей электрической части ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ», кВт;  
 $K_c$  – коэффициент спроса потребителей электрической части ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ», принимаемый по справочным данным, о.е. [6].

Реактивная расчётная мощность одиночных присоединений потребителей распределительных щитов силовой и осветительной сети электрической части ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» [11]:

$$Q_{np} = P_{np} \cdot tg\varphi, \quad (2)$$

где  $tg \varphi$  – «нормируемый коэффициент реактивной мощности, соответствующий текущему значению коэффициента активной мощности системы ( $cos \varphi$ ). С учётом компенсации реактивной мощности до нормируемого значения  $cos \varphi = 0,93$  на шинах энергосистемы, в работе принимается соответствующее ему значение  $tg \varphi = 0,4$ » [8].

Полная расчётная мощность одиночных присоединений потребителей распределительных щитов силовой и осветительной сети электрической части ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» [11]:

$$S_{np} = \sqrt{P_{np}^2 + Q_{np}^2}. \quad (3)$$

Расчётный ток нормального режима одиночных присоединений потребителей распределительных щитов силовой и осветительной сети электрической части ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» [11]:

$$I_{np} = \frac{S_{np}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}, \quad (4)$$

где  $U_{ном.}$  – номинальное напряжение сети, кВ [1].

На основании приведенных выражений (1) – (4) для расчёта электрических нагрузок проводится практический расчёт активной, реактивной, полной мощностей, а также расчётного тока нагрузки нормального режима, для всех одиночных присоединений потребителей ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ».

Проводится расчёт нагрузки одиночных присоединений подстанции на примере первого присоединения – ЩР-1.

По условию (1) расчётная активная мощность ЩР-1 ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ»:

$$P_p = 8,5 \cdot 0,65 = 5,53 \text{ кВт.}$$

По условию (2) расчётная реактивная мощность ЩР-1 ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ»:

$$Q_p = 5,53 \cdot 0,33 = 1,82 \text{ квар.}$$

По условию (3) расчётная полная мощность ЩР-1 ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ»:

$$S_p = \sqrt{5,53^2 + 1,82^2} = 5,82 \text{ кВА.}$$

По условию (4) расчётное значение тока нагрузки нормального режима ЩР-1 ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ»:

$$I_p = \frac{5,82}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 8,84 \text{ А.}$$

«Аналогично проведён расчёт электрических нагрузок для остальных присоединений потребителей понизительной подстанции ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ», результаты которого приведены в таблице 2» [17].

Также расчёт суммарной нагрузки секций сборных шин и всей питающей подстанции ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» проводится с учётом коэффициента одновременности максимума нагрузки согласно [14]. В связи с этим, проверено условие равномерности распределения нагрузки по секциям. Для удовлетворения данному условию и по условию отсутствия перекоса фаз на взаиморезервируемых секциях сборных шин различие мощностей должно быть не более 20 %. Данное условие выполняется (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты расчёта электрических нагрузок ТП-6/0,4 кВ

| ЩР (ЩО)      | Характеристика потребителей ЩР (ЩО) | $P_{ном}$ , кВт | $k_c$ | $P_p$ , кВт | $Q_p$ , кВар | $S_p$ , кВА | $I_p$ , А |
|--------------|-------------------------------------|-----------------|-------|-------------|--------------|-------------|-----------|
| I секция шин |                                     |                 |       |             |              |             |           |
| ЩР-1         | Силовой распределительный щит       | 8,50            | 0,65  | 5,53        | 1,82         | 5,82        | 8,84      |
| ЩР-2         | Силовой распределительный щит       | 8,20            | 0,20  | 1,64        | 0,54         | 1,73        | 2,66      |
| ЩР-3         | Силовой распределительный щит       | 46,86           | 0,73  | 33,97       | 11,21        | 35,77       | 55,03     |
| ЩР-4         | Силовой распределительный щит       | 9,10            | 0,45  | 4,10        | 1,35         | 4,32        | 6,64      |
| ЩР-5         | Силовой распределительный щит       | 109,60          | 0,55  | 60,28       | 19,89        | 63,48       | 97,66     |
| ЩР-6         | Силовой распределительный щит       | 10,50           | 0,73  | 7,61        | 2,51         | 8,01        | 12,33     |
| ЩР-7         | Силовой распределительный щит       | 0,35            | 1,00  | 0,35        | 0,11         | 0,37        | 0,57      |
| ЩР-8         | Силовой распределительный щит       | 7,00            | 0,60  | 4,20        | 1,39         | 4,42        | 6,80      |
| ЩР-9         | Силовой распределительный щит       | 220,50          | 0,70  | 154,35      | 50,94        | 162,54      | 250,1     |
| ЩР-10        | Силовой распределительный щит       | 0,14            | 1,00  | 0,14        | 0,05         | 0,15        | 0,23      |
| ЩР-11        | Силовой распределительный щит       | 10,85           | 0,50  | 5,43        | 1,79         | 5,72        | 8,80      |
| ЩР-12        | Силовой распределительный щит       | 32,00           | 1,00  | 32,00       | 10,56        | 33,70       | 51,84     |



Продолжение таблицы 2

| ЩР<br>(ЩО)                  | Характеристика<br>потребителей ЩР (ЩО) | $P_{ном}$ ,<br>кВт | $k_c$ | $P_p$ ,<br>кВт | $Q_p$ ,<br>кВар | $S_p$ ,<br>кВА | $I_p$ ,<br>А |
|-----------------------------|--|--------------------|-------|----------------|-----------------|----------------|--------------|
| I секция шин                |  |                    |       |                |                 |                |              |
| ЩО-1                        | Внутреннее рабочее<br>освещение        | 43,34              | 0,52  | 22,54          | 7,44            | 23,74          | 36,52        |
| ЩО-2                        | Наружное рабочее<br>освещение          | 3,60               | 1,00  | 3,60           | 1,19            | 3,79           | 5,83         |
| Всего электроосвещение      |  | 46,94              | —     | 26,14          | 8,63            | 27,53          | 42,35        |
| Всего силовое оборудование  |  | 463,60             | —     | 309,59         | 102,16          | 326,03         | 501,46       |
| Итого секция I              |  | 510,54             | —     | 335,73         | 110,79          | 353,56         | 543,81       |
| II секция шин               |  |                    |       |                |                 |                |              |
| ЩР-13                       | Силовой<br>распределительный щит       | 195,71             | 0,50  | 97,86          | 32,29           | 103,05         | 158,5        |
| ЩР-14                       | Силовой<br>распределительный щит       | 251,70             | 0,45  | 113,27         | 37,34           | 119,28         | 183,5        |
| ЩР-15                       | Силовой<br>распределительный щит       | 54,00              | 0,90  | 48,60          | 16,04           | 51,18          | 78,74        |
| ЩР-16                       | Силовой<br>распределительный щит       | 300,00             | 0,50  | 150,00         | 49,50           | 157,96         | 243,0        |
| ЩО-3                        | Аварийное освещение                    | 4,7                | 1,00  | 4,7            | 1,55            | 4,95           | 7,61         |
| ЩО-4                        | Наружное аварийное осв-е               | 0,5                | 1,00  | 0,5            | 0,17            | 0,53           | 0,81         |
| Всего электроосвещение      |  | 5,2                | —     | 5,2            | 1,72            | 5,48           | 8,42         |
| Всего силовое оборудование  |  | 801,41             | —     | 409,73         | 135,2           | 431,47         | 663,8        |
| Итого секция II             |  | 806,61             | —     | 414,93         | 136,9           | 436,95         | 672,2        |
| Итого по секциям I и II ВРУ |  | 1317,15            | —     | 750,66         | 247,7           | 790,51         | 1216,0       |

## 2.2 Проверка силовых трансформаторов по перегрузочной способности

Как было указано ранее, на рассматриваемой подстанции ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» были установлены два силовых трансформатора ТМГ-630/6.

Оба силовых трансформатора находятся в технически исправном состоянии и периодически проходили регламентные текущие и капитальные ремонты. Они были заменены в результате реконструкции, проведённой на подстанции в 2012 году.

«Как известно, номинальная мощность силового трансформатора для его установки на подстанции переменного напряжения ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ»

определяется с учётом запаса перспективного питания сторонней нагрузки по условию» [13]:

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

где  $S_{\text{ном.т.}}$  – номинальная мощность силового трансформатора подстанции ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ»;

$S_{\text{ном.т.р}}$  – расчетная мощность трансформатора, установленного на подстанции переменного напряжения ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ»;

$P_{\text{р.}}$  – суммарная активная нагрузка потребителей»;

$P_{\text{ст.}}$  – суммарная активная нагрузка сторонних потребителей».

«По условию выбора (5), при отсутствии в схеме подстанции ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» сторонних потребителей:

$$S_{\text{ном.т}} \geq S_{\text{ном.т.р}} = \frac{750,66}{2 \cdot 0,8} = 469,16 \text{ кВА}.$$

Исходя из результатов расчёта, для установки на ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ», следует выбрать два силовых трансформатора мощностью 630 кВА.

«Поэтому установленные трансформаторы марки ТМГ-630/6 удовлетворяют условию (5)» [12].

«Как правило, такая методика выбора типоминимала трансформатора позволяет подобрать оптимальную мощность трансформатора из-за чего значительно уменьшаются потери электроэнергии и перетоки реактивной мощности» [12].

Проверка выбранного типа силового трансформатора в нормальном режиме работы [12]:

$$K_3^H = \frac{0,5 \cdot S_p}{S_{ном.т}} \leq 0,8. \quad (6)$$

Проверка выбранных трансформаторов на подстанции ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» в нормальном режиме производится по условию (6):

$$K_3^H = \frac{790,51}{630 \cdot 2} = 0,63 \leq 0,8.$$

Каждый трансформатор при этом питается от отдельной линии, подключенной к независимому источнику питания. Следовательно, два силовых трансформатора, установленных на подстанции, должны получать питание от различных независимых источников с учётом резервирования в схеме.

«В случае выхода из строя одного из трансформаторов на подстанции, второй силовой трансформатор, в соответствии с допустимой аварийной перегрузкой, обеспечивает питание всех потребителей, подключенных к питающей ТП-6/0,4 кВ» [1]. Перевод нагрузки с отказавшего или выведенного в ремонт трансформатора на трансформатор, оставшийся в работе, должен осуществляться автоматически под действием автоматического включения резерва [1]. Таким образом, в схеме электроснабжения не будет «холодного резерва», который не рекомендуем [5].

Исходя из этого, проверка выбранного типа силового трансформатора в максимальном режиме проводится по условию [12]:

$$K_3^{n.ав} = \frac{S_p}{S_{ном.т}} \leq 1,6. \quad (7)$$

Проверка трансформаторов на подстанции ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» в максимальном режиме производится по условию (7):

$$K_3^{n.ав} = \frac{585,6}{630 \cdot (2-1)} = 0,93 \leq 1,4.$$

Все условия проверок для силовых трансформаторов марки ТМГ-630/6 соблюдены, поэтому они могут быть рекомендованы к установке на объекте исследования в результате проведения мероприятий по проектированию системы электроснабжения [12].

### 2.3 Выбор типа и компоновки трансформаторной подстанции

«В качестве питающей ТП-6/0,4 кВ «Объединённого института ядерных исследований» применяется блочная комплектная трансформаторная подстанция наружной установки с двумя силовыми трансформаторами мощностью 630 кВА и распределительными устройствами (2БКТП)» [14].

Основные характеристики 2БКТП с двумя силовыми трансформаторами ТМГ-630/6 [14] приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Основные технические характеристики 2БКТП с двумя силовыми трансформаторами ТМГ-630/6

| Строительная часть | Габариты, мм<br>(длина × ширина × высота) | Полная масса, т. |
|--------------------|---|------------------|
| 2БКТП              | 4210 × 4250 × 2210                        | 25               |
| Кабельный блок     | 4000 × 2500 × 1000                        | 5                |

Далее в работе проводится описание компоновки и основных элементов выбранного типа подстанции [14].

В БКТП каждый блок подстанции разделён на два отсека, при этом в одном отсеке расположен силовой трансформатор, а в другом – высоковольтное и низковольтное электрооборудование.

«Ввод и вывод силовых кабелей осуществляется через кабельный блок, имеющий по периметру запечатанные отверстия круглой формы,

что позволяет прокладывать кабели в асбестоцементных трубах с последующей заделкой пустот» [9].

«В полу отсека распределительных устройств имеется люк, закрытый металлическими крышками, обеспечивающий доступ в кабельный полуподвал. В кабельном блоке, под трансформатором, обязательно устанавливается маслосборник. БКТП снаружи грунтуется краской серого цвета для последующей отделки в необходимый цвет. Гидроизоляция поверхности крыши БКТП и кабельного блока произведена путем нанесения на бетонную поверхность мастики холодного применения. Такой способ надёжен и рассчитан на двадцать лет работы без капитального ремонта поверхности» [4].

Стандартная поставка БКТП, применяющаяся на объекте проектирования, включает следующую компоновку:

- строительная часть с металлоконструкциями в сборе – 2 шт.;
- силовой трансформатор ТМГ-630/6 – 2 шт.;
- камера распределительного устройства 6 кВ – 2 шт.;
- шкаф низковольтный вводной ШНВ-12/2500 – 2 шт.;
- шкаф низковольтный секционный ШНС-12/2000 – 1 шт.;
- шкаф низковольтный линейный ШНЛ-12/630-2000 – в зависимости от количества присоединений (определяется заказчиком на стадии согласования);
- ящик собственных нужд – 2 шт.;
- шкаф учета – 2 шт. (по необходимости);
- кабельные перемычки – 1 комплект;
- адаптер (в зависимости от количества подключений и необходимости);
- шкаф защитных средств (ящик Щмп1) – 2 шт.;
- комплект протоколов приемо-сдаточных испытаний;
- паспорт на БКТП;

- комплект монтажных устройств, приспособлений и деталей;
- инструкция по эксплуатации.

Также в комплект поставки входят ограждающие барьеры, устанавливаемые со стороны ввода трансформаторного отсека.

## 2.4 Выбор и проверка проводников

Далее необходимо провести выбор и проверку проводников системы электроснабжения «Объединённого института ядерных исследований». В работе выбору подлежат следующие проводники:

- напряжением 6 кВ: питающая кабельная линия, состоящая из двух силовых кабелей, для питания ТП-6/0,4 кВ от энергосистемы по радиальной схеме;
- напряжением 0,38/0,22 кВ: питающая кабельная сеть для обеспечения электроснабжения ВРУ объекта от РУ-0,4 кВ ТП-6/0,4 кВ;
- напряжением 0,38/0,22 кВ: питающая кабельная сеть для обеспечения электроснабжения ЩР и ЩО объекта от ВРУ.

«В работе проводится практический расчёт и выбор сечения и марки питающей кабельной линии напряжением 6 кВ ТП-6/0,4 кВ с последующей её проверкой, по методике» [7]. «Согласно принятой методике расчёта, питающая кабельная линия напряжением 6 кВ для питания ТП-6/0,4 кВ подлежит выбору по экономической плотности тока с проверкой по условиям допустимого перегрева и допустимых потерь напряжения» [13].

Расчётный рабочий ток [7]:

$$I_{p.} = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{ном.}} \quad (8)$$

Максимальный расчётный ток линии [11]:

$$I_{p.max} = 1,4I_p \quad (9)$$

Проверка кабельной линии по условию нагрева максимальным рабочим током [11]:

$$I_{доп} \geq I_{p.max} \cdot \quad (10)$$

где  $I_{доп}$  – «длительно-допустимый ток силового кабеля стандартного сечения, А [1];

$I_{p.max}$  – максимальный ток участка (линии) с учётом перегрузок и резервирования, А» [1].

«Проводники напряжением выше 1 кВ выбираются по экономической плотности тока» [1]:

$$F_э = \frac{I_{p.}}{j_э} \cdot \quad (11)$$

«В результате проверочного выбора силовых трансформаторов ТП-6/0,4 кВ было рекомендовано использовать на подстанции два силовых трансформатора марки ТМГ-630/6 с номинальной мощностью 630 кВА. Эта стандартная мощность принимается в качестве расчётной при выборе питающей кабельной линии на стороне 6 кВ ТП-6/0,4 кВ» [17].

Следовательно, с учётом этих фактов (8):

$$I_{p.} = \frac{630}{\sqrt{3} \cdot 6} = 60,6 \text{ А.}$$

Расчётное сечение питающей кабельной линии 6 кВ, использующейся для питания ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» (11):

$$F_{\text{э.}} = \frac{60,6}{1,6} = 37,8 \text{ мм}^2$$

Исходя из результатов расчёта, для питания ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» принимается сечение на питающей кабельной линии 6 кВ, равное 50 мм<sup>2</sup>. «Предварительно принимается к установке силовой трёхжильный кабель марки АСБл-6 (3×50) с предельным допустимым током нагрева при прокладке в земле  $I_{\text{доп}}=150 \text{ А}$ » [12].

Максимальный расчётный ток на питающей кабельной линии 6 кВ ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» (11):

$$I_{p.\text{max}} = 1,4 \cdot 60,6 \approx 85 \text{ А.}$$

Условия проверки питающей кабельной линии 6 кВ ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» по условию допустимого нагрева в послеаварийном режиме, выполняется (10):

$$90 \text{ А} \geq 85 \text{ А.}$$

«Следовательно, исходя из полученных результатов, для питающей кабельной линии 6 кВ ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ», окончательно выбирается силовой кабель марки АСБл-6 (3×50), условия прокладки – в стандартной земляной траншее» [3].

«Для электроснабжения питающей сети потребителей напряжением 0,38/0,22 кВ «ОИЯИ» (ВРУ, ЩР и ЩО) в работе приняты низковольтные пятижильные кабели из поливинилхлоридного пластиката пониженной пожароопасности, не распространяющие горение при групповой прокладке марки (ВВГнг-LS)» [9]. Выбор кабельных линий 0,38/0,22 кВ для питания потребителей участка системы электроснабжения «Объединённого института



ядерных исследований» осуществляется по условиям допустимого перегрева (10).

Результаты выбора и проверки приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты выбора сечения кабелей питающей сети 0,38/0,22 кВ потребителей участка системы электроснабжения «Объединённого института ядерных исследований»

| Потребитель        | $I_p, A$ | Марка кабеля     | $I_{доп}, A$ |
|--------------------|----------|------------------|--------------|
| Секция шин I ВРУ   |          |                  |              |
| ЩР-1               | 8,84     | ВВГнг-LS (5×2,5) | 40,0         |
| ЩР-2               | 2,66     | ВВГнг-LS (5×2,5) | 40,0         |
| ЩР-3               | 55,03    | ВВГнг-LS (5×6)   | 64,0         |
| ЩР-4               | 6,64     | ВВГнг-LS (5×2,5) | 40,0         |
| ЩР-5               | 97,66    | ВВГнг-LS (5×16)  | 112,0        |
| ЩР-6               | 12,33    | ВВГнг-LS (5×2,5) | 40,0         |
| ЩР-7               | 0,57     | ВВГнг-LS (5×2,5) | 40,0         |
| ЩР-8               | 6,80     | ВВГнг-LS (5×2,5) | 40,0         |
| ЩР-9               | 250,06   | ВВГнг-LS (5×70)  | 253,0        |
| ЩР-10              | 0,23     | ВВГнг-LS (5×2,5) | 40,0         |
| ЩР-11              | 8,80     | ВВГнг-LS (5×2,5) | 40,0         |
| ЩР-12              | 51,84    | ВВГнг-LS (5×6)   | 64,0         |
| ЩО-1               | 36,52    | ВВГнг-LS (5×2,5) | 40,0         |
| ЩО-2               | 5,83     | ВВГнг-LS (5×2,5) | 40,0         |
| КЛ к секции I ВРУ  | 543,81   | ВВГнг-LS (5×300) | 583,0        |
| Секция шин II ВРУ  |          |                  |              |
| ЩР-13              | 158,54   | ВВГнг-LS (5×35)  | 173,0        |
| ЩР-14              | 183,50   | ВВГнг-LS (5×50)  | 205,0        |
| ЩР-15              | 78,74    | ВВГнг-LS (5×10)  | 86,0         |
| ЩР-16              | 243,01   | ВВГнг-LS (5×70)  | 253,0        |
| ЩО-3               | 7,61     | ВВГнг-LS (5×2,5) | 40,0         |
| ЩО-4               | 0,81     | ВВГнг-LS (5×2,5) | 40,0         |
| КЛ к секции II ВРУ | 672,21   | ВВГнг-LS (5×400) | 679,0        |

Все выбранные проводники системы электроснабжения «Объединённого института ядерных исследований» удовлетворяют условиям выбора и проверки, поэтому могут быть применены на данном объекте.

Выбор сборных шин распределительного устройства 6 кВ ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» проводится по рассчитанному максимальному рабочему току.

В РУ-6 кВ ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» в результате проведения реконструкции схемы, рекомендована к применению основная жёсткая ошиновка из сборных алюминиевых шин марки АДЗ1Т-5×25-3 АДЗ1Т, а также ответвительная

жѐсткая ошиновка марки ОЖ-СЭЩ-6/2000 [8]. Такие виды и типы ошиновки типичны для применения в соответствующих распределительных устройствах комплектного типа современных понизительных подстанций [8].

Проводится проверка выбранной ошиновки по максимальному рабочему току [10]:

$$1450 A \geq 85 A.$$

Условие проверки выполняется, следовательно, в качестве ошиновки для установки в РУ-6 кВ принимается жѐсткая ошиновка из сборных алюминиевых шин.

В качестве ответвительной жѐсткой ошиновки, которая используется для присоединения электрических аппаратов трансформаторных вводов, отходящих линий к сборным шинам РУ 6 кВ ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ», принимается современная жѐсткая ошиновка марки ОЖ-СЭЩ-6/2000 с  $I_{дон} = 2000 A$  [7].

Условие проверки этой ошиновки для установки в РУ-6 кВ ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» выполняется (10):

$$2000 A \geq 85 A.$$

Таким образом, для второго трансформаторного ввода и питающей его кабельной линий 6 кВ ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» это условие также будет выполнено.

Исходя из поставленной задачи, в результате практической реализации предложенных мероприятий по реконструкции схемы электрических соединений РУ-6 кВ ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ», а также учитывая полную замену ячеек РУ-6 кВ с основным оборудованием, в работе выбраны и проверены сечения проводников:

- для питающей кабельной линии 6 кВ ТП-6/0,4 кВ объекта выбраны силовые кабели марки АСБл-6(3×50), условия прокладки – в стандартной земляной траншее;
- для электроснабжения питающей и распределительной сети потребителей напряжением 0,38/0,22 кВ объекта (ВРУ, ЩР и ЩО), в работе приняты низковольтные пятижильные негорючие кабели марки ВВГнг-LS при питании по радиальной схеме без ответвлений;
- в качестве ошиновки для установки в РУ-6 кВ принята жёсткая ошиновка из сборные алюминиевых шин марки АДЗ1Т-5×25-3 АДЗ1Т с допустимым током одной секции шин  $I_{don}=1450$  А;
- в качестве ответвительной жёсткой ошиновки (для присоединения электрических аппаратов трансформаторных вводов, отходящих линий к сборным шинам РУ 6 кВ ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ»), принята современная жёсткая ошиновка марки ОЖ-СЭЦ-6/2000 с  $I_{don} = 2000$  А.

## 2.5 Расчёт токов короткого замыкания

Далее в работе проводится расчёт значения максимального тока трёхфазного короткого замыкания на сборных шинах низкой стороны ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ», по которому будут проверены на термическую и электродинамическую стойкость электрические аппараты и шинные конструкции в соответствующих распределительных устройствах подстанции.

Так как на ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» установлены два однотипных, одинаковых по номиналу и мощности силовых трансформатора мощностью 630 кВА каждый, результаты расчёта токов КЗ в сети 0,4 кВ за ними будут соответствовать друг другу.

Значения токов КЗ в системе ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» будут использованы при выборе и проверке нового оборудования распределительного устройства РУ-6 кВ и РУ-0,4. Кроме того будут проверены уставки устройств релейной

защиты и автоматики на условия чувствительности. Для этой цели в работе также необходимо провести расчёт минимального двухфазного тока КЗ.

«Исходная упрощённая расчётная схема для расчёта токов КЗ на понизительной подстанции ТП-6/0,4 кВ «Объединённого института ядерных исследований» представлена на рисунке 1.

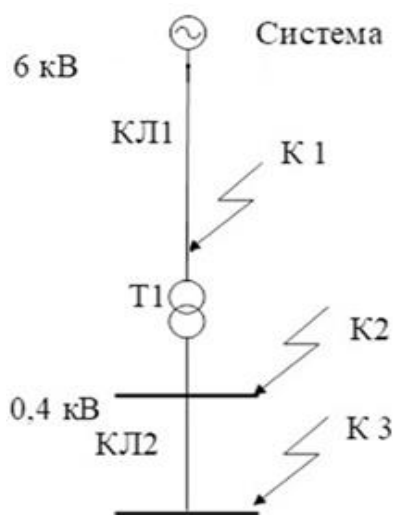


Рисунок 1 – Упрощённая схема для расчётов токов КЗ.

Исходя из расчетной схемы составляется схема замещения для расчёта токов КЗ на ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» (рисунок 2).

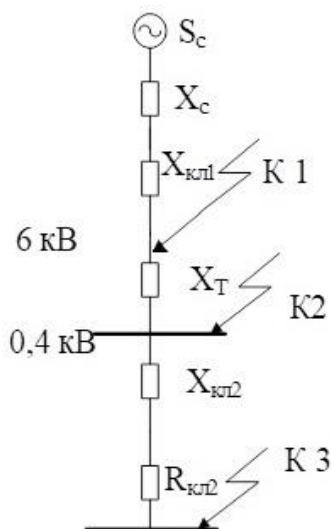


Рисунок 2 – Схема замещения для расчёта токов КЗ.

Далее определяются сопротивления элементов сети по представленной схеме замещения. Все расчёты производятся в относительных единицах при последующем переводе полученного результата расчёта максимального тока КЗ в именованные единицы.

Выбираются базисные условия для проведения расчётов.

«В качестве основной базисной ступени выбирается ступень высшего напряжения – 6 кВ. Мощность энергосистемы принимается равной номинальной полной мощности трансформаторов ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» [16].

«Таким образом базисная мощность ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» [6]:

$$S_{\sigma} = 630 \text{ кВА} = 0,63 \text{ МВА.}$$

Базисное напряжение схемы электроснабжения «Объединённого института ядерных исследований» [6]:

$$U_{\sigma} = 1,05 \cdot U_{\text{ном}}, \text{кВ.} \quad (12)$$

По условию (12):

$$U_{\sigma,1} = 1,05 \cdot 6 = 6,3 \text{ кВ.}$$

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

Базисный ток на сторонах ВН и НН схемы замещения системы электроснабжения «Объединённого института ядерных исследований» [8]:

$$I_{\sigma} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3}U_{\sigma}}. \quad (13)$$

По условию (13):

$$I_{\delta 1} = \frac{0,63}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 0,03 \text{ кА.}$$

$$I_{\delta 2} = \frac{0,63}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 0,9 \text{ кА.}$$

Значение индуктивного сопротивления кабельных линий схемы замещения, с учётом длины линии и удельных сопротивлений кабеля, для каждой цепи линии при приведении результатов к базисным условиям [16]:

$$X_W = \frac{1}{n} \cdot X_{уд.W1} \cdot L_{W1} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_B^2}. \quad (14)$$

Для кабельных линий схемы, с учётом их номинальных условий (14):

$$X_{KL1} = \frac{1}{2} \cdot 0,4 \cdot 6 \cdot \frac{0,63}{6,3^2} = 0,005 \text{ о.е.}$$

$$X_{KL2} = 0,09 \cdot 0,15 \cdot \frac{0,63}{0,4^2} = 0,0135 \text{ о.е.}$$

«Известно, что при расчёте токов КЗ в сетях 6(10)/0,4 кВ необходимо учитывать активные сопротивления всех элементов схемы замещения» [8].

«Значение активного сопротивления кабельных линий схемы замещения, с учётом длины линии и удельных сопротивлений кабеля, для каждой цепи линии при приведении результатов к базисным условиям» [16]:

$$R_W = \frac{1}{n} \cdot R_{уд.W1} \cdot L_{W1} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_B^2}. \quad (15)$$

Для кабельных линий схемы с учётом их номинальных условий (15):

$$R_{KL1} = \frac{1}{2} \cdot 0,46 \cdot 6 \cdot \frac{0,63}{6,3^2} = 0,006 \text{ o.e.}$$

$$R_{KL2} = 0,62 \cdot 0,15 \cdot \frac{0,63}{0,4^2} = 0,093 \text{ o.e.}$$

Индуктивное сопротивление силового трансформатора [16]:

$$X_{T1} = \frac{1}{n} \cdot \frac{U_{K.3.}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{H.T.}}. \quad (16)$$

$$X_{T1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{10,5}{100} \cdot \frac{0,63}{0,63} = 0,0525 \text{ o.e.}$$

«Максимальное значение токов трёхфазного КЗ в расчётных точках схемы системы электроснабжения «Объединённого института ядерных исследований» при приведении к именованным единицам, определяется по выражению» [16]:

$$X_{T1} = \frac{1}{n} \cdot \frac{U_{K.3.}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{H.T.}}. \quad (17)$$

Полное сопротивление цепи КЗ до расчётной точки К1 [16]:

$$Z_{\Sigma k1} = \sqrt{(X_c + X_{KL1})^2 + R_{KL2}^2}. \quad (18)$$

В числовом виде (18):

$$Z_{\Sigma k1} = \sqrt{(0,005 + 0,005)^2 + 0,006^2} = 0,012 \text{ o.e.}$$

Ток КЗ в расчётной точке К1:

$$I_{\kappa 1}^{(3)} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot Z_{\kappa 1}} \quad (19)$$

$$I_{\kappa 1}^{(3)} = \frac{1}{0,012} \cdot 0,03 = 1,25 \text{ кА.}$$

Полное сопротивление цепи КЗ до расчётной точки К2

$$Z_{\Sigma k 2} = \sqrt{(X_c + X_{KЛ1} + X_T)^2 + R_{KЛ2}^2}. \quad (19)$$

$$Z_{\Sigma k 2} = \sqrt{(0,005 + 0,005 + 0,0525)^2 + 0,006^2} = 0,062 \text{ о.е.}$$

Ток КЗ в точке К2:

$$I_{\kappa 2}^{(3)} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot Z_{\kappa 2}}$$

$$I_{\kappa 2}^{(3)} = \frac{1}{0,062} \cdot 0,9 = 3,71 \text{ кА.}$$

Полное сопротивление цепи до расчётной точки К3:

$$Z_{\Sigma k 3} = \sqrt{(X_c + X_{KЛ1} + X_T + X_{KЛ2})^2 + (R_{KЛ1} + R_{KЛ2})^2}. \quad (20)$$

$$Z_{\Sigma k 3} = \sqrt{(0,005 + 0,005 + 0,0525 + 0,0135)^2 + (0,006 + 0,093)^2} = 0,125 \text{ о.е.}$$

Ток КЗ в точке К3:

$$I_{\kappa 3}^{(3)} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot Z_{\kappa 3}}$$

$$I_{\kappa 3}^{(3)} = \frac{1}{0,125} \cdot 0,9 = 1,84 \text{ кА.}$$



Ударный ток при максимальном значении трёхфазного КЗ в расчётных точках схемы:

$$i_{y\partial} = \sqrt{2} \cdot K_{y\partial} \cdot I_{\kappa}^{(3)}. \quad (21)$$

Численное значение ударного тока при максимальных значениях трёхфазных токов КЗ в расчётных точках схемы:

$$i_{y\partial.\kappa1} = \sqrt{2} \cdot 1,4 \cdot 1,25 = 2,47 \text{ кА.}$$

$$i_{y\partial.\kappa2} = \sqrt{2} \cdot 1,0 \cdot 3,71 = 5,25 \text{ кА.}$$

$$i_{y\partial.\kappa3} = \sqrt{2} \cdot 1,0 \cdot 1,84 = 2,6 \text{ кА.}$$

«Известно, что двухфазное КЗ является несимметричным, поэтому для определения начального действующего значения тока  $I_{\kappa}^{(2)}$ , при двухфазном КЗ в точке К1 необходимо знать не только сопротивления прямой, но и сопротивления обратной последовательности элементов расчетной схемы. В рассматриваемом случае, в целях упрощения расчетов сопротивления элементов схемы замещения обратной последовательности, принимаются равными сопротивлениям схемы замещения прямой последовательности ( $x_1^{\kappa} = x_2^{\kappa}$ )» [3].

Формула для расчёта двухфазного несимметричного тока КЗ, необходимого для проверки условий чувствительности уставок РЗА:

$$I_{\kappa}^{(2)} = 0,87 \cdot I_{\kappa}^{(3)}, \text{ кА.} \quad (22)$$

Двухфазное КЗ в точках К1-К3 в числовых значениях:

$$I_{\kappa1}^{(2)} = 0,87 \cdot 1,25 = 1,09 \text{ кА.}$$

$$I_{к2}^{(2)} = 0,87 \cdot 3,71 = 3,23 \text{ кА}$$

$$I_{к3}^{(2)} = 0,87 \cdot 1,84 = 1,60 \text{ кА}$$

Дальнейший расчет для других точек выполнен аналогично. Все полученные в работе результаты расчёта токов трёхфазного и двухфазного короткого замыкания, а также ударных токов, выполненных в расчётных точках КЗ системы электроснабжения «Объединённого института ядерных исследований», приведены в форме таблицы 5.

Таблица 5 – Результаты расчетов токов короткого замыкания в расчётных точках системы электроснабжения «Объединённого института ядерных исследований»

| Параметр       | Единица измерения | Числовое значение параметра |          |          |
|----------------|-------------------|-----------------------------|----------|----------|
|                |                   | Точка К1                    | Точка К2 | Точка К3 |
| $I_{к3}^{(3)}$ | кА                | 1,25                        | 3,71     | 1,84     |
| $I_{к3}^{(2)}$ | кА                | 1,09                        | 3,23     | 1,60     |
| $i_{уд.к}$     | кА                | 2,47                        | 5,25     | 2,60     |

Полученные результаты расчёта токов короткого замыкания используются в работе для проверки и выбора основного оборудования подстанции и устройств релейной защиты, а также для проверки уставок релейной по условиям чувствительности защиты силовых трансформаторов и питающих линий на стороне 6 кВ объекта исследования.

## 2.6 Выбор и проверка электрических аппаратов

Далее в работе, на основании технических данных подстанции и полученных расчётных результатов электрических нагрузок, рабочих и максимальных токов, а также токов трёхфазного КЗ, проводится непосредственный выбор и проверка основного оборудования

распределительных устройств с целью проведения модернизации ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» путём замены ячеек и оборудования в РУ-6 кВ.

Ранее в работе было установлено, что к морально и технически устаревшим электрическим аппаратам относятся устаревшие масляные горшковые выключатели высокого напряжения, которые являются ненадёжным оборудованием. Также, было установлено, что требуют замены все устаревшие ячейки РУ-6 кВ типа КСО-366. Перечисленное оборудование предлагается заменить на более современные модификации, отличающиеся повышенными критериями надёжности, экономичности, безопасности, а также быстродействием и селективностью.

На основании обзора современных типов ячеек распределительных устройств классов напряжения 6(10) кВ, в работе в РУ-6 кВ предложено установить новые ячейки комплектного распределительного устройство типа КРУ D-12Р (рисунке 3).



Рисунок 3 – Внешний вид и конструкция ячеек комплектного распределительного устройство типа КРУ D-12Р

Данные ячейки компактные с небольшой массой, с высокой защитой от дуги и имеют широкий диапазон рабочих параметров. Они обладают широким диапазоном применяемого оборудования с возможностью интеграции в систему автоматического и дистанционного управления распределительным устройством.

Предварительно для установки в новых ячейках КРУ D-12P принимаются выключатели вакуумные нового образца и модификации, предназначенные для установки в ячейках КРУ, марки VD-4-10-20/630-У2-48 (производитель – фирма АВВ, Швеция). Разъединители в новых ячейках КРУ D-12P не устанавливаются по технической комплектации, их заменяют втычные контакты.

Выбор предлагаемых выключателей производится, исходя из следующих условий [18]:

- по номинальному напряжению:

$$U_{уст} \leq U_{ном}, \quad (23)$$

где  $U_{уст}$ ,  $U_{ном}$  – напряжение установки и номинальное напряжение выключателя;

- по максимальному рабочему току:

$$I_{раб.макс} \leq I_n, \quad (24)$$

где  $I_{раб.макс}$ ,  $I_n$  – максимальный рабочий ток ПАВ режима электроустановки и номинальное значение тока выключателя;

- проверка выключателя на симметричный ток отключения:

$$I_{пт} \leq I_{откл}, \quad (25)$$

где  $I_{\pi\tau}$  – значение периодической составляющей тока короткого замыкания в момент начала расхождения дугогасительных контактов;

$I_{откл.н}$  – номинальный ток отключения выбранного выключателя, кА;

– проверка выключателя на отключение асимметричного тока КЗ [7]:

$$(\sqrt{2} \cdot I_{\pi\tau} + i_{a\tau}) \leq \sqrt{2} \cdot I_{откл.н} (1 + \beta_n), \quad (26)$$

где  $i_{a\tau}$  – значение аperiodической составляющей тока короткого замыкания в момент расхождения контактов;

$\beta_n$  – номинальное значение относительного содержания аperiodической составляющей в отключаемом токе КЗ;

$\tau$  – наименьшее время от начала короткого замыкания до момента расхождения дугогасительных контактов, определяется так:

$$t = t_{з.мин} + t_{с.в}, \quad (27)$$

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

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

– на электродинамическую устойчивость выбранный выключатель проверяется по значению предельного сквозного тока КЗ [18]:

$$i_y \leq i_{пр.с}, \quad (28)$$

где  $i_{пр.с}$  – действующее значение предельного сквозного тока КЗ;

$i_y$  – ударный ток короткого замыкания в цепи выключателя;

– проверка выключателя на термическую стойкость по значению теплового импульса [18]:

$$B_{\kappa} \leq I_T^2 t_T, \quad (29)$$

где  $B_{\kappa}$  – тепловой импульс по расчёту,  $A^2 \cdot c$ ;

$I_T$  – предельный ток термической устойчивости,  $A^2 \cdot c$ ;

$t_T$  – длительность протекания тока термической устойчивости, с.

При этом тепловой импульс с учётом токов КЗ и отключения цепи:

$$B_{\kappa} = I_{\kappa}^2 (t_{отк} + T_a). \quad (30)$$

По приведённым выше условиям, с учётом рассчитанных параметров электрической сети 6 кВ, далее в работе необходимо осуществить проверку выключателей высокого напряжения для их установки в соответствующих распределительных устройствах на реконструируемой и модернизируемой ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ».

Результаты выбора выключателей высокого напряжения представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты выбора новых выключателей высокого напряжения для установки в РУ-6 кВ ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ»

| Наименование аппарата  | Условие выбора                     | Расчетные данные  | Паспортные данные  |
|--|------------------------------------|---|--|
| Выключатели высокого напряжения VD-4-10-20/630-У2-48 (производитель – фирма АBB, Швеция) | $U_{сети} \leq U_{ном.}$           | $U_{сети} = 6 \text{ кВ.}$  | $U_{ном} = 10 \text{ кВ.}$                                 |
|  | $I_{max} \leq I_{ном.}$            | $I_{max} = 50,98 \text{ А.}$                                      | $I_{ном} = 630 \text{ А.}$                                 |
|  | $I_{п.т} \leq I_{отк.ном.}$        | $I_{п.т} = 1,25 \text{ кА.}$                                      | $I_{отк.ном} = 20 \text{ кА.}$                             |
|  | $i_y \leq i_{дин.}$                | $i_y = 2,47 \text{ кА.}$  | $i_{дин.} = 32 \text{ кА.}$                                |
|  | $B_{\kappa} \leq I_T^2 \cdot t_T.$ | $I_T^2 \cdot t_T = 1,25^2 \cdot 3 = 4,69 \text{ кА}^2 \text{ с.}$ | $B_{\kappa} = 20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2 \text{ с.}$ |

Выбранные выключатели удовлетворяют всем требуемым условиям. Совместно с данными выключателями в ячейках также устанавливаются ограничители перенапряжения марки ОПН-КР/TEL-10/12 УХЛ1.

Также вместе с высоковольтными выключателями, в ячейках РУ-6 кВ ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» устанавливаются трансформаторы тока (таблица 7).

Таблица 7 – Результаты выбора трансформаторов тока для установки в ячейках РУ-6 кВ ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ»

| Наименование аппарата           | Условие выбора              | Расчетные данные   | Паспортные данные  |
|---------------------------------|-----------------------------|--|--|
| Трансформаторы тока<br>ТПОЛМ-10 | $U_{сети} \leq U_{ном.}$    | $U_{сети} = 6 \text{ кВ.}$   | $U_{ном} = 10 \text{ кВ.}$                               |
|                                 | $I_{max} \leq I_{ном.}$     | $I_{max} = 50,98 \text{ А.}$   | $I_{ном} = 100 \text{ А.}$                               |
|                                 | $i_y \leq i_{дин.}$         | $i_y = 2,47 \text{ кА.}$   | $i_{дин.} = 20 \text{ кА.}$                              |
|                                 | $B_K \leq I_T^2 \cdot t_T.$ | $I_T^2 \cdot t_T = 1,25^2 \cdot 3 =$<br>$= 4,69 \text{ кА}^2\text{с.}$ | $B_K = 20^2 \cdot 3 =$<br>$= 1200 \text{ кА}^2\text{с.}$ |

Далее проводится проверочный расчёт электрических аппаратов напряжением 0,38/0,22 кВ системы электроснабжения «Объединённого института ядерных исследований». Установлено, что они не нуждаются в модернизации, поэтому в работе выполняется их проверка на соответствие условиям сети. Для защиты и коммутации питающей и распределительной сети 0,38/0,22 кВ в работе применяются автоматические выключатели. Они устанавливаются в РУ-0,4 кВ питающей ТП-6/0,4 кВ, а также во ВРУ для защиты и коммутации отходящих ЩР и ЩО.

Автоматические выключатели обеспечивают автоматическое отключение цепи под действием токов КЗ и прочих ненормальных режимов. Также автоматы используются в коммутационных схемах с целью включения и отключения линий. Такие процессы возможно осуществлять как в автоматическом режиме, так и в ручном.

Основными элементами автомата, обеспечивающим отключение, являются расцепители. Наибольшее распространение получили автоматы с тепловыми и электромагнитными типами расцепителей. Номинальные токи автомата и уставки теплового расцепителя выбираются, исходя из условий [15]:

$$I_{ном.а} \geq I_p \cdot \quad (31)$$

$$I_{у.т.р} \geq 1,1 \cdot I_p \cdot \quad (32)$$

Ток электромагнитного расцепителя [15]:

$$I_{ном.э.р} \geq K_{то} \cdot I_p \geq I_k \cdot \quad (33)$$

В случае, если автомат выполнен с регулируемым электромагнитным расцепителем, зависящим от тока уставки теплового расцепителя [15]:

$$I_{у.э.р} \geq K \cdot I_{у.т.р}, \quad (34)$$

где  $K$  – кратность тока уставки электромагнитного расцепителя [19].

Результаты выбора автоматических выключателей системы электроснабжения «Объединённого института ядерных исследований» приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты выбора трёхфазных автоматов ввода и секционного автомата ТП-6/0,4 кВ, а также питающей и распределительной сети системы электроснабжения «Объединённого института ядерных исследований»

| Потребитель           | $I_p$ , А | Марка    | $I_{ном.а}$ , А | $I_{у.т.р}$ , А | $I_{у.э.р}$ , А |
|-----------------------|-----------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ТП-6/0,4 кВ           |           |          |                 |                 |                 |
| Вводные автоматы      | 969,2     | ВА 55-41 | 1000            | 1000            | 3000            |
| Секционный автомат    | 860,12    | ВА 55-41 | 1000            | 1000            | 3000            |
| ВРУ                   |           |          |                 |                 |                 |
| Вводной автомат СШ I  | 543,81    | ВА 57-39 | 630             | 630             | 1890            |
| Вводной автомат СШ II | 672,21    | ВА 55-41 | 1000            | 1000            | 3000            |
| Секционный автомат    | 615,54    | ВА 57-39 | 630             | 630             | 1890            |
| ЩР1                   | 8,84      | ВА 47-29 | 10              | 10              | 30              |
| ЩР2                   | 2,66      | ВА 47-29 | 6,3             | 6,3             | 18,9            |
| ЩР3                   | 55,03     | ВА 52-31 | 100             | 63              | 189             |
| ЩР4                   | 6,64      | ВА 47-29 | 10              | 10              | 30              |
| ЩР5                   | 97,66     | ВА 52-31 | 100             | 100             | 300             |
| ЩР6                   | 12,33     | ВА 47-29 | 16              | 16              | 48              |



Продолжение таблицы 8

| Потребитель | $I_p$ , А | Марка    | $I_{ном.а}$ , А | $I_{у.т.р.}$ , А | $I_{у.э.р.}$ , А |
|-------------|-----------|----------|-----------------|------------------|------------------|
| ТП-6/0,4 кВ |           |          |                 |                  |                  |
| ЩР7         | 0,57      | ВА 47-29 | 6,3             | 6,3              | 18,9             |
| ЩР8         | 6,80      | ВА 47-29 | 10              | 10               | 30               |
| ЩР9         | 250,06    | ВА 52-37 | 400             | 320              | 960              |
| ЩР10        | 0,23      | ВА 47-29 | 6,3             | 6,3              | 18,9             |
| ЩР11        | 8,80      | ВА 47-29 | 10              | 10               | 30               |
| ЩР12        | 51,84     | ВА 52-31 | 100             | 63               | 189              |
| ЩО1         | 36,52     | ВА 47-29 | 40              | 40               | 120              |
| ЩО2         | 5,83      | ВА 47-29 | 6,3             | 6,3              | 18,9             |
| ЩР13        | 158,54    | ВА 52-35 | 250             | 200              | 600              |
| ЩР14        | 183,50    | ВА 52-35 | 250             | 200              | 600              |
| ЩР15        | 78,74     | ВА 52-31 | 100             | 100              | 300              |
| ЩР16        | 243,01    | ВА 52-35 | 250             | 200              | 600              |
| ЩО3         | 7,61      | ВА 47-29 | 10              | 10               | 30               |
| ЩО4         | 0,81      | ВА 47-29 | 6,3             | 6,3              | 18,9             |

Все коммутационные и защитные электрические аппараты, выбранные для установки в РУ-6 кВ и РУ-0,4 кВ кВ ТП-6/0,4 кВ, а также питающей и распределительной сети системы электроснабжения «Объединённого института ядерных исследований» проверены по условиям термической и динамической устойчивости и по соответствию максимальным расчётным токам схемы. Исходя из полученных проверочных результатов, они могут быть применены в данных технических условиях системы электроснабжения объекта проектирования.

Выводы по разделу 2.

В данном разделе был проведен расчёт нагрузок отдельных присоединений, секций сборных шин, а также всей трансформаторной подстанции ТП-6/0,4 кВ в целом.

Для установки на трансформаторной подстанции ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» обоснованы и рекомендованы силовые трансформаторы марки ТМГ-630/6. В качестве конструктивного выполнения понизительной подстанции выбрана современная блочная комплектная трансформаторная подстанция, имеющая значительные преимущества перед аналогичными разработками.

Выбраны и проверены сечения проводников трансформаторной подстанции ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ», а также питающих и распределительных сетей системы электроснабжения организации. Для питающей кабельной линии 6 кВ ТП-6/0,4 кВ объекта выбраны силовые кабели марки АСБл-6(3×50), условия прокладки – в стандартной земляной траншее. Для электроснабжения питающей сети потребителей напряжением 0,38/0,22 кВ объекта (ВРУ, ЩР и ЩО) в работе приняты низковольтные пятижильные кабели марки ВВГнг-LS при питании по радиальной схеме без ответвлений.

Проведён расчёт максимальных токов трёхфазного и двухфазного короткого замыкания, а также ударных токов, в сети 6 кВ и 0,38/0,22 кВ;

Выбраны новые современные ячейки РУ-6 кВ комплектного распределительного устройство типа КРУ D-12P. Для установки в новых ячейках КРУ выбраны высоковольтные выключатели марки VD-4-10-20/630-У2-48, а также трансформаторы тока марки ТПОЛМ-10;

Произведена проверка существующих автоматических выключателей в сети 0,38/0,22 кВ по номинальному току и по условиям срабатывания электромагнитного и теплового расцепителей.

### 3 Релейная защита и автоматика реконструированной подстанции

#### 3.1 Выбор блоков релейной защиты и автоматики

В работе проводится выбор блоков РЗА для защиты выбранного оборудования трансформаторной подстанции ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ».

В старых ячейках типа КСО-366, которые были установлены изначально в РУ-6 кВ были установлены комплекты защит на базе электромеханических типов реле РТ-40, РТМ и РТВ-80. Известно, что устаревшее и изношенное оборудование электромеханической релейной защиты не обеспечивает требуемый уровень защит элементов ПС и отходящих линий [12]. Поэтому следует произвести замену существующих комплектов защит на современные микропроцессорные терминалы, имеющие надёжный уровень быстродействия, надёжности и селективности. Сравнительная техническая характеристика современных терминалов РЗА для защиты силовых трансформаторов ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» приведена в таблице 9.

Таблица 9 – Сравнительная техническая характеристика терминалов релейной защиты для защиты силовых трансформаторов ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ»

| Сравнительные величины                 | Сириус-Т                       | БМРЗ-153-УЗТ             | RET 521                  |
|--|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Интерфейсы связи                       | 2×RS-485,<br>2×Ethernet RJ45   | RS-485,<br>Ethernet RJ45 | RS-485, Ethernet<br>RJ45 |
| Назначение                             | Защита силовых трансформаторов |                          |                          |
| Ёмкость памяти архива событий, Мб      | 1000                           | 512                      | 512                      |
| Ёмкость памяти архива срабатываний, Мб | 75                             | 25                       | 25                       |
| Потребляемая мощность, Вт, не более    | 25                             | 30                       | 28                       |
| Масса не более, кг                     | 7                              | 7,8                      | 7,4                      |

По приведенным показателям видно, что терминал Сириус-Т производства ЗАО «Радиус-Автоматика» обладает наиболее высокими техническими характеристиками. Внешний вид данного терминала показан на рисунке 4.



Рисунок 4 – Внешний вид терминала Сириус-Т

Функции защиты терминала Сириус-Т:

- двухступенчатая дифференциальная токовая защита (ДТЗ);
- цифровое выравнивание параметров фазы токов плечей ДТЗ;
- компенсация токов небаланса от РПН;
- контроль небаланса в плечах ДТЗ;
- возможность подключения газового реле и устройства РПН;
- ненаправленная двухступенчатая максимальная токовая защита (МТЗ) и токовая отсечка (ТО) со стороны ВН;
- цифровая сборка токовых цепей ВН в треугольник;
- программная блокировка защит по гармоникам;
- защита от перегрузки.

Релейная защита питающей кабельной линии 6 кВ ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» также выполняется на современных микропроцессорных терминалах.

Сравнительная техническая характеристика некоторых современных терминалов релейной защиты линий приведена в таблице 10.

Таблица 10 – Сравнительные технические характеристики терминалов релейной защиты отходящих линий 6 кВ

| Сравнительные величины                 | Сириус-2Л-02                              | БМРЗ-101-Д-КЛ-01      | ТОР 200 Л      |
|--|---|-----------------------|----------------|
| Назначение                             | Универсальный, защита любых присоединений | Защита КЛ             | Защита КЛ и ВЛ |
| Интерфейсы связи                       | 2×RS-485, 2×Ethernet RJ45                 | RS-485, Ethernet RJ45 | RS-485         |
| Емкость памяти архива событий, Мб      | 1000                                      | 512                   | 512            |
| Емкость памяти архива срабатываний, Мб | 50  | 25                    | 25             |
| Потребляемая мощность, Вт, не более    | 25  | 32                    | 30             |
| Масса не более, кг                     | 7   | 7,4                   | 7,6            |

Исходя из приведенных параметров видно, что терминал Сириус-2Л-02 производства ЗАО «Радиус-Автоматика» обладает наиболее высокими техническими характеристиками. Внешний вид данного терминала показан на рисунке 5.



Рисунок 5 – Внешний вид терминала Сириус-2Л-02

Функции защиты терминала Сириус-2Л-02:

- дуговая защита;
- МТЗ;
- ТО;
- от обрыва фазы;
- от замыканий на землю (ЗНЗ);
- защита минимального напряжения;
- защита от повышения напряжения;
- возможность подключения газового реле;
- автоматическая частотная разгрузка;
- частотное автоматическое включение;
- контроль наличия напряжения;
- автоматика управления выключателем;
- автоматическое повторное включение линий;
- определение расстояния до места повреждения в линии.

Далее в работе выбираются уставки РЗиА для защиты элементов ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ».

### **3.2 Выбор уставок релейной защиты и автоматики блоков РЗиА**

Выбор уставок релейной защиты и автоматики для защиты кабельных линий 6 кВ и силовых трансформаторов ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» производится на основе рассчитанных значений токов коротких замыканий в выбранных точках.

Предусмотренные виды защит силовых трансформаторов ТП-6/0,4 кВ «Объединённого института ядерных исследований» и токи, выставяемые в блоках защиты, приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Предусмотренные виды защит силовых трансформаторов ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» и токи, выставяемые в блоках защиты

| Тип защиты                        | Токи, выставяемые в блоках защиты                         |
|-----------------------------------|---|
| Максимальная токовая защита (МТЗ) | $I''=1,25$ кА (трехфазный ток КЗ, ввод ВН)                |
| Токовая отсечка (ТО)              | $I''=1,25$ кА (трехфазный ток КЗ, ввод ВН)                |
| Защита от перегрузки              | $I_{ном}=51$ А (максимальный ток трансформатора, ввод ВН) |

Защита питающих кабельных линий ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» предусматривается на РП-6 кВ. Уставки и типы РЗиА, применяемых для защиты данных кабельных линий 6 кВ приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Предусмотренные виды защит кабельных линий 6 кВ и токи, выставяемые в блоках защиты

| Тип защиты                         | Токи, выставяемые в блоках защиты   |
|------------------------------------|---|
| Максимальная токовая защита (МТЗ)  | $I''=1,25$ кА (трехфазный ток КЗ)<br>$I^{(2)}=1,09$ кА двухфазный ток КЗ) |
| Токовая отсечка (ТО)               | $I''=1,25$ кА (трехфазный ток КЗ)<br>$I^{(2)}=1,09$ кА двухфазный ток КЗ) |
| Защита от замыканий на землю (ЗНЗ) | $I^{(1)}=5$ А   |

Выводы по разделу 3.

В данном разделе, на основе расчета токов КЗ, выбраны уставки основных устройств микропроцессорных блоков релейной защиты и автоматики силовых трансформаторов 6/0,4 кВ и питающих линий на подстанции ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ».

Произведено обоснование применения микропроцессорных блоков (терминалов) РЗиА:

- терминал Сириус-Т – для защиты силовых трансформаторов подстанции;
- терминал Сириус-2Л-02 – для защиты питающих линий 6 кВ подстанции.

#### **4 Требования к надежности электроснабжения и качеству электроэнергии**

Электроснабжение ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» осуществляется от РП-6 кВ, который подключен от ГПП-1 110/6 кВ №134 «Дубна». Данная главная понизительная подстанция обеспечивает своим потребителям вторую категорию по надежности и бесперебойности электроснабжения. Надежность электроснабжения связана с работой основного оборудования сетей электроснабжения и характеризуется количеством отключений, а качество электроэнергии характеризуется следующими параметрами:

- отклонение напряжения;
- колебание напряжения;
- несинусоидальность напряжения;
- несимметрия напряжения;
- отклонение частоты.

Вышеперечисленные параметры влияют на работу средств учета.

Контроль за качеством электроэнергии и параметрами сети осуществляется АСУ, предусмотренной на подстанции. Данная система связана с приборами учета электроэнергии, оснащенными специальными контроллерами – ARIS, которые работают в фоновом режиме. Счетчик фиксирует моменты выхода параметров за установленные пределы, запоминает точное время этого события и суммирует время их нахождения за этими пределами.

Выводы по разделу 4.

Контроль за качеством электроэнергии осуществляется приборами учета электроэнергии, оснащенными специальными контроллерами. Они интегрируются в систему АСУ ТП и тем самым осуществляют регистрацию, сбор и передачу данных параметров подстанции на сервер автоматизированной системы управления.



## **5 Перечень мероприятий по заземлению (занулению) и молниезащите**

Для защиты от опасного действия электрического тока путём снижения напряжения прикосновения до безопасного значения для человека необходимо выполнить заземление оборудования. Для реализации заземления оборудования в здании корпуса 1А используется существующий контур заземления вокруг здания, который выполнен из 17 электродов из уголка 50×50 длиной 3 метра, соединённых между собой полосой 4×40. Наружный контур заземления через гильзы соединяются полосой 4×40 с внутренним контуром заземления, который выполнен полосой 4×40 по всему зданию корпуса 1А. Рабочие параметры действующих контуров заземления здания корпуса 1А соответствуют нормативным показателям в соответствии с требованиями гл. 1.7 ПУЭ. Внутренний контур заземления трансформаторной подстанции ТП-6/0,4 кВ выполнен стальной полосой 40×4 мм по периметру контуру ячеек. В рамках проведения мероприятий по модернизации оборудования ячеек, связанных с заменой электрооборудования, предусматриваются следующие мероприятия по заземлению:

- защитное заземление вновь установленного оборудования путем присоединения корпусов и рам оборудования к внутреннему контуру заземления стальной полосой 25×4 мм;
- заземление металлических кронштейнов для установки оборудования изоляторов путем присоединения их к внутреннему контуру заземления стальной полосой 25×4 мм.

Молниезащита здания трансформаторной подстанции ТП-6/0,4 кВ выполняется по III категории согласно «Инструкции по молниезащите зданий и сооружений» РД 34.21.122-87 и в модернизации не нуждается. В помещении РУ-6 кВ подстанции в корпусе 1А проектом предусматривается замена внутреннего контура заземления.

Вывод по разделу 5.

Новый внутренний контур заземления предусматривается из стальной полосы сечением 40×4 мм, выполненный по периметру помещения на высоте 400 мм от уровня пола. Новый внутренний контур заземления присоединяется к существующему контуру заземления здания не менее чем в двух местах на сварку. К контуру заземления присоединяются все корпуса ячеек и щитов, рамы для установки оборудования, кабельные лотки и конструкции. Соединение корпусов щитов с внутренним контуром заземления выполняется стальной полосой сечением не менее 25×4 мм. Подвесные кабельные конструкции присоединяются к внутреннему контуру заземления гибкой медной проволокой сечением не менее 16 мм<sup>2</sup>.

Молниезащита Корпуса 1А выполнена по III категории согласно «Инструкции по молниезащите зданий и сооружений» РД 34.21.122-87.

## Заключение

В результате выполнения работы проведена реконструкция схемы электрических соединений нормального режима трансформаторной подстанции ТП-6/0,4 кВ «Объединённого института ядерных исследований», с модернизацией устаревших ячеек и их силового оборудования в распределительном устройстве 6 кВ данной подстанции. А также выполнение комплекса мер по защите от воздействия опасного электрического тока на человека путём снижения напряжения прикосновения до безопасного значения.

После осуществления практических мероприятий по реконструкции схемы электрических соединений РУ-6 кВ, с учётом модернизации устаревшего оборудования и замены ячеек на трансформаторной подстанции ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» обоснованы и рекомендованы к внедрению следующие практические мероприятия:

- реконструкцию схемы электрических соединений ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» предлагается осуществить путём внесения качественных изменений в схему соединений РУ-6 кВ подстанции. При этом предложено принять новую схему питания ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» от РП-6 кВ: радиальная схема с резервированием на высшем и низшем напряжениях. На высшем напряжении (6 кВ), резервирование будет осуществляться на РП-6 кВ на секционном выключателе с АВР (автоматический ввод резерва), а на стороне низшего напряжения подстанции, эту функцию будет осуществлять секционный автоматический выключатель. Такая схема будет удовлетворять требованиям надежности электроснабжения потребителей первой и второй категорий;
- предложенную модернизацию ячеек РУ-6 кВ ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ», осуществляемую с заменой устаревшего основного оборудования, планируется внедрить вместе с реконструкцией схемы электрических

соединений подстанции. Таким образом, в работе предложено заменить неэффективные, ненадёжные и старые ячейки типа КСО-366 с оборудованием 6 кВ, на современные ячейки типа КРУ внутренней установки.

В результате внедрения практических мероприятий по реконструкции схемы электрических соединений РУ-6 кВ, с учётом проведения модернизации устаревшего оборудования и замены типа ячеек, на трансформаторной подстанции ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» решены следующие задачи:

- проведён расчёт нагрузок отдельных присоединений, секций сборных шин, а также всей трансформаторной подстанции ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» в целом;
- обосновано применение силовых трансформаторов марки ТМГ-630/6. Выбранные трансформаторы проверены по условиям перегрузочной способности;
- выбрана современная блочная комплектная трансформаторная подстанция с трансформаторами ТМГ-630/6;
- выбраны и проверены сечения проводников трансформаторной подстанции ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ», а также питающей и распределительной сетей системы электроснабжения организации. Для питающей кабельной линии 6 кВ ТП-6/0,4 кВ выбраны силовые кабели марки АСБл-6 (3×50), условия прокладки – в стандартной земляной траншее. Для электроснабжения питающей сети потребителей напряжением 0,38/0,22 кВ объекта (ВРУ, ЩР и ЩО) в работе приняты низковольтные пятижильные кабели марки ВВГнг-LS при питании по радиальной схеме без ответвлений;
- проведён расчёт максимальных токов трёхфазного и двухфазного короткозамыкания, а также ударных токов, в сети 6 кВ и 0,4 кВ;
- выбраны новые современные ячейки РУ-6 кВ комплектного распределительного устройство типа КРУ D-12P;

- для установки в новых ячейках КРУ D-12P обоснован выбор вакуумных выключателей нового образца и модификации марки VD-4-10-20/630-У2-48, а также трансформаторов тока марки ТПОЛМ-10;
- проверено оборудование для установки в РУ-0,4 кВ трансформаторной подстанции ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ», а также в питающей и распределительной системе электроснабжения организации напряжением 0,38/0,22 кВ, в результате чего проверены вводные и секционный автоматические выключатели для установки в РУ-0,4 кВ питающей ТП-6/0,4 кВ, а также вводные, секционный и линейные автоматы ВРУ для защиты и коммутации отходящих ЩР и ЩО.

Расчитаны уставки основных устройств микропроцессорных блоков релейной защиты и автоматики силовых трансформаторов 6/0,4 кВ и питающих линий на подстанции ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ». Для применения на объекте исследования обоснован выбор микропроцессорных блоков РЗиА:

- терминал Сириус-Т – для защиты силовых трансформаторов;
- терминал Сириус-2Л-02 – для защиты питающих линий 6 кВ;

Так же осуществлена возможность контроля за качеством электроэнергии при помощи АСУ. С помощью специальных контроллеров выполняется регистрация параметров работы энергосистемы площадки с функциями записи осциллограмм и хранения их на сервере АСУ ТП, для последующего анализа работы системы и выявления неисправностей.

Таким образом, в работе расчётно-аналитическим путём решена комплексная задача по внедрению предложенных мероприятий по реконструкции схемы электрических соединений нормального режима и модернизации оборудования ТП-6/0,4 кВ «ОИЯИ» с учётом приведённых дополнительных аспектов по проверке силовых трансформаторов и линий.

## Список используемых источников

1. ГОСТ Р 59279-2020 «Схемы принципиальные электрические распределительных устройств от 35 до 750 кВ подстанций». [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200177281> (дата обращения: 29.01.2023).
2. Кадомская К.П., Лавров Ю.А. Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Вологда: Инфра-Инженерия, 2018. 343 с.
3. Китунович Ф.Г. Энергетика России. 1920-2020 гг. В 4 томах. М.: Энергия, 2020. 1072 с.
4. Климова Г.Н. Электроэнергетические системы и сети. Энергосбережение. Учебное пособие. М.: Юрайт, 2016. 180 с.
5. Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов. М.: Академия, 2020. 320 с.
6. КРУ «Классика» серии D-12PT. [Электронный ресурс]: URL: <https://websor.ru/oborudovanie-i-materialy/podstanciya/kamery-kso/d-12pt/> (дата обращения: 29.01.2023).
7. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учеб. пособие для ВУЗов. 5-е издание, перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2018. 608 с.
8. Никитенко Г.В. Электрооборудование, электротехнологии и электроснабжение. Дипломное проектирование: Учебное пособие. СПб. Лань, 2018. 316 с.
9. Официальный сайт Объединённого института ядерных исследований. [Электронный ресурс]: URL: <http://www.jinr.ru/about/> (дата обращения: 29.01.2023).
10. Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. 4-е изд., перераб. и доп. М: Энергоатомиздат, 2019. 174 с.
11. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей.

Госэнергонадзор Минэнерго России. М.: ЗАО «Энергосервис», 2019. 324 с.

12. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). М.: Альвис, 2018. 632 с.

13. Продукция «РАДИУС Автоматика». Терминалы «Сириус» [Электронный ресурс]: URL: [https://ep.ru/product/radius\\_a\\_30.php](https://ep.ru/product/radius_a_30.php) (дата обращения: 29.01.2023).

14. Рожкова Л.Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций: Учебник для студентов учреждений среднего профессионального образования. М.: ИЦ Академия, 2018. 448 с.

15. Свириденко Э.А. Основы электротехники и электроснабжения. М.: Техноперспектива, 2018. 436 с.

16. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. 4-е изд., перераб. и доп. М.: ЭНАС, 2018. 312 с.

17. СТО 56947007- 29.240.30.047-2010. «Рекомендации по применению типовых принципиальных электрических схем распределительных устройств подстанций 35 - 750 кВ». [Электронный ресурс]: URL: <https://www.twirpx.com/file/2616342/> (дата обращения: 28.01.2023).

18. СТО 56947007-29.240.30.010-2008. «Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35-750 кВ. Типовые решения». [Электронный ресурс]: URL: <https://www.twirpx.com/file/24666/> (дата обращения: 28.10.2022).

19. Федеральный закон «Об электроэнергетике» от 26.03.2003 № 35-ФЗ об энергосбережении [Электронный ресурс]: URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_41502/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_41502/) (дата обращения: 27.01.2023).

20. 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».