

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Блинова Светлана Павловна
Должность: Директор колледжа
Дата подписания: 25.06.2026 15:03:27
Уникальный программный ключ:
0314c6dbf971f61282da74d9ff82f8c839276729



**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
«Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского»
Политехнический колледж**

А.Т. Зайцева

**«ЭЛЕГАЗОВОЕ КОМПЛЕКТНОЕ
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО (КРУЭ) 110
кВ»**

Методические указания по выполнению лабораторных работ с
применением технологий виртуальной реальности
для студентов специальности
13.02.13 «Эксплуатации и обслуживание электрического и
электромеханического оборудования»

НОРИЛЬСК, 2026

УДК 621.316 — КОММУТАЦИОННАЯ АППАРАТУРА (КРУЭ)

Методические указания для студентов по проведению лабораторно-практических занятий междисциплинарного курса «Общая энергетика и электроснабжение» разработаны на основе Федерального государственного образовательного стандарта (ФГОС3+) для специальности 13.02.13 Эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования.

Организация -разработчик: Политехнический колледж ФГБОУ ВО «Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского»

Разработчик: Зайцева Алиса Тагировна, заведующий электромеханическим отделением

Рассмотрено на заседании цикловой комиссии электромеханических дисциплин

Председатель комиссии _____

Утверждена методическим советом политехнического колледжа ФГБОУ ВО «Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского»

Протокол заседания методического совета № 6 от «27» 05 2026г.

Зам. директора по УВР



О.И. Трошкина

Содержание

Введение

1 Организация работы с VR-оборудованием

1.1 Общие положения и допуск к работе

1.2 Требования к рабочему месту и помещению

1.3 Подготовка и осмотр оборудования

1.4 Правила поведения до начала работы

1.5 Требования безопасности во время работы

1.6 Действия в аварийных ситуациях

1.7 Требования безопасности по окончании работы

2 Порядок включения гарнитуры и запуска программного обеспечения

2.1 Надевание и регулировка гарнитуры

2.2. Включение гарнитуры и настройка охраняемой зоны

2.3. Запуск приложения «KRUE»

2.4. Проверка загрузки сценария

2.5. Органы управления в виртуальной среде

2.6. Навигация по сценарию демонстрации

Лабораторная работа №1. Изучение устройства, компоновки и главных схем КРУЭ 110 кВ с использованием технологий VR-визуализации

Лабораторная работа №2. Изучение шкафов управления, мнемосхем и оперативных схем КРУЭ 110 кВ с использованием VR-визуализации

Лабораторная работа №3. Изучение кабельных подключений и системы заземления КРУЭ 110 кВ с использованием VR-визуализации

Лабораторная работа №4. Изучение элегазового выключателя 110 кВ и трансформаторов тока с использованием VR-визуализации

Лабораторная работа №5. Изучение трансформаторов напряжения, разъединителей и заземлителей КРУЭ 110 кВ с использованием VR-визуализации

Лабораторная работа №6. Изучение шинопроводов и шиносоединительного выключателя КРУЭ 110 кВ с использованием VR-визуализации

Список рекомендуемой литературы

1. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С VR-ОБОРУДОВАНИЕМ И ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

1.1. Общие положения и допуск к работе

1.1.1. К выполнению лабораторных работ с использованием гарнитуры виртуальной реальности (VR) Meta Quest допускаются студенты, прошедшие вводный инструктаж по технике безопасности и ознакомившиеся с настоящими методическими указаниями.

1.1.2. Запрещается работать с VR-оборудованием лицам, находящимся в состоянии утомления или болезни, а также лицам с нарушениями вестибулярного аппарата, эпилепсией и другими заболеваниями, при которых использование VR-технологий противопоказано.

1.1.3. Студент обязан соблюдать правила внутреннего распорядка, дисциплину труда и неукоснительно выполнять требования преподавателя.

1.2. Требования к рабочему месту и помещению

1.2.1. Рабочая зона должна представлять собой свободное пространство размером не менее 2×2 метра.

1.2.2. В рабочей зоне должны быть полностью удалены препятствия, мебель, провода и другие предметы, о которые можно споткнуться или удариться.

1.2.3. Пол должен быть сухим, ровным и не скользким.

1.2.4. Помещение должно быть хорошо проветриваемым и освещенным. Следует избегать попадания прямых солнечных лучей на объективы гарнитуры (во избежание выгорания матрицы), а также работы в полной темноте (для корректной работы системы пространственного трекинга).

1.2.5. Во время работы студента в VR преподаватель (или лаборант) обязан находиться в непосредственной близости для контроля физического перемещения студента и предотвращения столкновений с окружающими предметами или людьми.

1.3. Подготовка и осмотр оборудования

1.3.1. Перед началом работы проверить уровень заряда батареи гарнитуры и манипуляторов. Уровень заряда должен составлять не менее 50 %.

1.3.2. Осмотреть гарнитуру и манипуляторы на предмет отсутствия механических повреждений, трещин, сколов и выступающих острых краев.

1.3.3. Санитарная обработка: перед выдачей оборудования каждому студенту внутренние поверхности гарнитуры (маска, лицевой интерфейс) и манипуляторы должны быть протерты дезинфицирующими салфетками, не содержащими агрессивных спиртов, способных повредить покрытие линз.

1.3.4. Убедиться в чистоте внешних и внутренних линз. Запрещается протирать линзы грубой тканью или бумажными салфетками (использовать только специальную микрофибру).

1.4. Правила поведения до начала работы

1.4.1. Надевать гарнитуру следует аккуратно, регулируя степень затяжки мягкого ремешка на затылке и колесика снизу левой части так, чтобы она плотно прилегала, но не сдавливала голову.

1.4.2. Перед запуском приложения убедиться, что система виртуальных границ (Guardian) настроена корректно и охватывает все доступное безопасное пространство.

1.4.3. Внимательно изучить органы управления: кнопки А и В на правом манипуляторе, а также расположение кнопки питания и системной кнопки.

1.4.4. Запрещается начинать работу, не убедившись в том, что вокруг достаточно свободного места.

1.5. Требования безопасности во время работы

1.5.1. Перемещаться в виртуальном пространстве следует плавно, без резких рывков, прыжков и быстрых поворотов тела.

1.5.2. Контроль границ: во время работы внимательно следить за виртуальными границами (Guardian). При приближении к ним система отобразит предупреждающую сетку — в этот момент необходимо немедленно остановиться и сделать шаг назад в центр безопасной зоны.

1.5.3. Запрещается снимать гарнитуру, не открыв предварительно глаза и не убедившись в устойчивости своего положения, так как это может привести к потере равновесия и падению.

1.5.4. Контроль самочувствия: при появлении первых признаков дискомфорта, головокружения, тошноты, головной боли или рези в глазах необходимо немедленно прекратить работу, нажать системную кнопку и сообщить об этом преподавателю.

1.5.5. Не рекомендуется использовать VR-гарнитуру непрерывно более 20–30 минут. При необходимости длительной работы следует делать перерывы продолжительностью не менее 10 минут.

1.5.6. Запрещается отвлекаться, разговаривать по телефону, а также принимать пищу и напитки во время нахождения в гарнитуре.

1.5.7. Безопасное обращение с манипуляторами: VR-контроллеры необходимо держать уверенно, желательно с использованием страховочных ремешков (если они предусмотрены конструкцией). Запрещается размахивать манипуляторами, совершать ими резкие движения с большой амплитудой, а также бросать или передавать их другому лицу во время работы в VR-среде. Потеря контроля над манипулятором может привести к повреждению оборудования или травмам окружающих.

1.5.8. Взаимодействие с окружающими: перед началом работы в VR-гарнитуре студент обязан предупредить находящихся в помещении о том, что он находится в виртуальной реальности и ограниченно воспринимает окружающее пространство. Посторонним лицам запрещается приближаться к работающему в VR-гарнитуре студенту ближе, чем на 1 метр без его предварительного согласия и снятия гарнитуры, так как внезапное прикосновение может вызвать у пользователя испуг, потерю равновесия и падение.

1.5.9. Контроль состояния гарнитуры: в случае запотевания линз, смещения гарнитуры на лице или появления посторонних шумов в аудиосистеме необходимо немедленно приостановить работу, вызвать системное меню и сообщить о проблеме преподавателю. Самостоятельная регулировка или снятие гарнитуры в состоянии погружения в виртуальную среду без предварительной остановки и фиксации своего положения в пространстве не допускается.

1.6. Действия в аварийных ситуациях

1.6.1. При плохом самочувствии: немедленно прекратить работу, аккуратно снять гарнитуру (сидя или с поддержкой ассистента), сесть, обеспечить доступ свежего воздуха и сообщить преподавателю.

1.6.2. При неисправности оборудования (зависание, перегрев, задымление): немедленно прекратить работу, снять гарнитуру, отключить ее (удерживая кнопку питания 10–15 секунд) и передать неисправное оборудование преподавателю. Эксплуатация гарнитуры с признаками перегрева (ощутимый нагрев корпуса, характерный запах плавящегося пластика) категорически запрещена до проведения диагностики.

1.6.3. При возникновении пожара или задымления в помещении: немедленно снять гарнитуру, оставить оборудование, покинуть помещение согласно плану эвакуации и сообщить о пожаре по телефону 101 или 112. VR-оборудование в данной ситуации не подлежит спасению — приоритетом является жизнь и здоровье людей.

1.6.4. При столкновении с другими лицами или предметами: если студент в VR-гарнитуре столкнулся с другим обучающимся, преподавателем или предметом обстановки, необходимо немедленно остановить работу, вызвать системное меню и снять гарнитуру. Преподаватель проводит проверку состояния всех участников инцидента, оценивает наличие травм и повреждений оборудования. При наличии повреждений гарнитуры или манипуляторов оборудование передаётся для диагностики. Инцидент фиксируется в журнале учёта работы VR-оборудования с указанием причин столкновения (например, недостаточный размер рабочей зоны, выход за границы Guardian, невнимательность окружающих).

1.7. Требования безопасности по окончании работы

1.7.1. Корректно завершить работу в приложении, вызвав системное меню нажатием кнопки на манипуляторе и выбрав пункт Выход (Quit).

1.7.2. Выключить гарнитуру и манипуляторы нажатием и удержанием кнопок питания (не менее 3–5 секунд) до появления характерного звукового сигнала и гашения индикации. Не допускается выключение оборудования путём полного разряда аккумуляторных батарей, так как это сокращает срок их службы.

1.7.3. Снять гарнитуру двумя руками, избегая резких движений и касания линз пальцами. Аккуратно уложить гарнитуру в защитный кейс или установить на зарядную станцию, обеспечив правильную ориентацию линз (вверх или в сторону от внешних воздействий). Манипуляторы разместить в штатных отсеках кейса либо на зарядной станции рядом с гарнитурой.

1.7.4. Сдать оборудование преподавателю или лаборанту под роспись (или по списку).

1.7.5. После работы с общим оборудованием (гарнитурой и манипуляторами) обязательно вымыть руки с мылом или обработать их антисептическим средством. Данное требование обусловлено тем, что VR-оборудование используется многократно разными студентами, и лицевой интерфейс гарнитуры, а также поверхности манипуляторов могут являться потенциальными переносчиками микроорганизмов.

1.7.6. Гигиеническая обработка гарнитуры после использования. После сдачи оборудования лаборант (или дежурный студент под контролем преподавателя) обязан провести санитарную обработку гарнитуры:

- протереть лицевой интерфейс (маску), ремни оголовья и наружные поверхности корпуса дезинфицирующими салфетками, не содержащими агрессивных спиртов и ацетона;
- обработать манипуляторы и их ремешки аналогичным способом;
- при необходимости очистить линзы специальной салфеткой из микрофибры (без применения жидкостей).

Данная операция является обязательной перед передачей оборудования следующему пользователю и обеспечивает соблюдение санитарно-гигиенических норм при коллективном использовании VR-гарнитуры.

1.7.7. Постановка оборудования на зарядку. После завершения гигиенической обработки гарнитура и манипуляторы должны быть установлены на зарядную станцию и подключены к источнику питания. Необходимо убедиться, что индикатор заряда начал отображать процесс зарядки (горит соответствующий светодиод). Уровень заряда к началу следующего занятия должен составлять не менее 50 % (оптимально — 100 %).

2. ПОРЯДОК ВКЛЮЧЕНИЯ ГАРНИТУРЫ И ЗАПУСКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

2.1. Надевание и регулировка гарнитуры

Перед началом работы необходимо правильно надеть гарнитуру виртуальной реальности и обеспечить её комфортное положение на голове пользователя.



Последовательность действий:

1. Возьмите гарнитуру Meta Quest двумя руками за боковые поверхности.

2. Аккуратно наденьте гарнитуру на голову, расположив лицевой интерфейс (маску) таким образом, чтобы он плотно прилегал к лицу.

3. Отрегулируйте степень прилегания с помощью:

- мягкого ремешка на затылке — обеспечивает фиксацию гарнитуры по окружности головы;
- регулировочного колесика, расположенного снизу с левой стороны гарнитуры, — обеспечивает точную подгонку по высоте и степени прижатия.

Требования к регулировке:

1. Гарнитура должна плотно прилегать к лицу, но не сдавливать голову.
2. Изображение в окулярах должно быть чётким, без размытия по краям.
3. При поворотах головы гарнитура не должна смещаться.

2.2. Включение гарнитуры и настройка охраняемой зоны

После регулировки гарнитуры необходимо выполнить её включение и настроить систему безопасности.

Последовательность действий:

1. Нажмите кнопку питания, расположенную на боковой поверхности гарнитуры, и удерживайте её до появления загрузочного логотипа.

2. Дождитесь полной загрузки операционной системы гарнитуры.

3. При первом включении или при необходимости система предложит настроить или подтвердить границы охраняемой зоны (Guardian).

4. Следуйте инструкциям, отображаемым на виртуальном экране, для настройки границ.

Важно: убедитесь, что виртуальная граница охватывает всё безопасное пространство рабочей зоны размером не менее 2×2 метра.

2.3. Запуск приложения «KRUE»

После настройки охраняемой зоны необходимо запустить специализированное приложение для работы с визуализацией КРУЭ.

Последовательность действий:

1. В главном меню (Панель управления) нажмите на кнопку «Приложения» (Библиотека), расположенную на панели инструментов.

2. В открывшемся окне в левой части выберите пункт «Неизвестные источники».

3. В правой части окна найдите приложение с названием «KRUE».

4. Нажмите на иконку приложения для его запуска.

5. Дождитесь полной загрузки сценария визуализации.



2.4. Проверка загрузки сценария

После запуска приложения необходимо убедиться в корректности загрузки виртуальной сцены.

Последовательность действий:

1. После загрузки в поле зрения пользователя должен появиться общий вид элегазового комплектного распределительного устройства (КРУЭ) 110 кВ.

2. Модель КРУЭ должна полностью помещаться в поле зрения пользователя.

3. Если первая точка обзора загрузилась, но КРУЭ не отображается в поле зрения, нажмите и удерживайте кнопку на манипуляторе для оцентровки положения взгляда.

2.5. Органы управления в виртуальной среде

Для эффективной работы в виртуальном пространстве необходимо изучить назначение органов управления VR-контроллера.

Стик (аналоговый джойстик) на VR-контроллере Meta Quest предназначен для выполнения следующих функций:

- плавного перемещения (локомоции) по виртуальному пространству — наклон стика в любом направлении обеспечивает перемещение точки обзора пользователя в соответствующую сторону. В рассматриваемом приложении «KRUE» локомоция ограничена заранее заданными точками обзора, поэтому стик используется преимущественно для навигации по меню;

- навигации по меню приложения — наклон стика вверх/вниз/влево/вправо позволяет перемещать курсор по пунктам меню, выбирать необходимые опции и подтверждать выбор;

- выполнения дополнительных действий при нажатии вниз (как обычная кнопка) — например, для телепортации в нужную точку или активации системных команд.

Кнопки навигации по сценарию (правый манипулятор):



Кнопка «В» — при однократном нажатии система автоматически перемещает пользователя в следующую точку обзора (с 1-й по 36-ю). Данная кнопка используется преимущественно для последовательного прохождения демонстрации.

Кнопка «А» — при однократном нажатии система автоматически перемещает пользователя в предыдущую точку обзора. Функция используется для повторного изучения материала, уточнения деталей или возврата к пояснениям преподавателя.

2.6. Навигация по сценарию демонстрации

Ознакомление с оборудованием КРУЭ происходит в ходе пошагового перемещения по заданным точкам в виртуальном пространстве. Каждая точка обзора представляет собой фиксированную позицию в виртуальном помещении КРУЭ, из которой открывается оптимальный вид на рассматриваемый элемент оборудования или инфографику.

Правила навигации:

1. Переход от одной точки обзора к следующей происходит автоматически после нажатия соответствующей кнопки на правом манипуляторе. Пользователь не осуществляет самостоятельного перемещения по виртуальному пространству (локомоции), что исключает риск дезориентации и потери равновесия. Система автоматически переносит пользователя в следующую заранее заданную точку, обеспечивая оптимальный ракурс для изучения оборудования. При этом пользователь может свободно осматриваться,

поворачивая голову в любом направлении для детального изучения элементов оборудования.

2. Демонстрация сопровождается подсветкой элементов, а также текстовыми и графическими описаниями (инфографикой):

– Подсветкой элементов — рассматриваемое оборудование или его части выделяются красным цветом или иным визуальным акцентом для привлечения внимания пользователя;

– Текстовыми описаниями — в поле зрения появляются текстовые пояснения с наименованием элемента, его назначением и техническими характеристиками;

– Графической инфографикой — в ряде точек демонстрируются схемы, чертежи, таблицы сравнения (например, на шаге 2 — сравнение площадей КРУЭ и ОРУ, на шаге 3 — нормальная схема электрических соединений ТЭЦ).

3. Предполагается сопровождение демонстрации пояснениями преподавателя.

Последовательность работы:

1. Внимательно осмотрите текущую точку обзора.
2. Прослушайте пояснения преподавателя.
3. Изучите представленную инфографику.
4. Для перехода к следующему шагу нажмите кнопку «В» на правом манипуляторе.
5. При необходимости вернуться к предыдущему шагу нажмите кнопку «А» на правом манипуляторе.

Завершение работы:

1. Последним шагом визуализации является точка с общим обзором КРУЭ.
2. Завершение работы приложения осуществляется через вызов системного меню нажатием кнопки на манипуляторе.



3. В появившемся системном меню необходимо нажать кнопку «Выход» (Quit).

4. Выключение гарнитуры осуществляется нажатием и удержанием кнопки питания.

5. Снять гарнитуру и сдать оборудование преподавателю.

6. Приступить к оформлению отчета по лабораторной работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

Изучение устройства, компоновки и главных схем КРУЭ 110 кВ с использованием технологий VR-визуализации

Цель работы:

- с использованием технологий виртуальной реальности (VR) изучить общее устройство и конструктивное исполнение элегазового комплектного распределительного устройства (КРУЭ) 110 кВ в масштабе, близком к 1:1;
- в интерактивной VR-среде ознакомиться с геометрическими размерами КРУЭ и оценить его преимущества по сравнению с открытыми распределительными устройствами (ОРУ);
- изучить главную электрическую схему распределительного устройства с помощью виртуальной визуализации и сопоставить её с трёхмерной моделью оборудования;
- сформировать пространственное представление о взаимном расположении основных элементов ячейки КРУЭ, шкафов управления, шинопроводов и кабельных подключений.

В ходе выполнения лабораторной работы студент должен:

- освоить последовательность включения VR-гарнитуры Meta Quest 3 и запуска специализированного приложения «KRUE»;
- получить визуальное представление о габаритных размерах типового модуля КРУЭ 110 кВ (высота 3170 мм, длина 11600 мм, ширина 4825 мм) и сопоставить их с площадью, занимаемой аналогичным ОРУ;
- изучить нормальную схему электрических соединений ТЭЦ и выделить в ней участок, соответствующий рассматриваемому КРУЭ 110 кВ с двумя рабочими системами сборных шин;
- научиться идентифицировать основные элементы ячейки КРУЭ на трёхмерной модели и на однолинейной электрической схеме;
- закрепить знания о принципах компоновки КРУЭ в закрытом помещении (расположение ячеек поперёк помещения, шинопроводов — вдоль помещения).

Материально-техническое обеспечение

Наименование	Характеристики
Гарнитура виртуальной реальности	Meta Quest 3, автономный режим работы
Программное обеспечение	Приложение «KRUE», версия 1.0
Источник распространения ПО	Раздел «Неизвестные источники» (Unknown Sources)
Рабочая зона	Свободное пространство не менее 2×2 метра, закрытое помещение
Уровень заряда батареи	Не менее 50 %

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

1.1. Общие сведения о комплектных распределительных устройствах

Комплектное распределительное устройство, заполненное элегазом (КРУЭ) – это современное высоковольтное оборудование, в котором токоведущие части, коммутационные аппараты и измерительные трансформаторы размещены в герметичных металлических оболочках, заполненных гексафторидом серы (элегазом, SF₆).

Главным преимуществом КРУЭ перед открытыми распределительными устройствами (ОРУ) является его высокая компактность. Благодаря превосходным изоляционным свойствам элегаза, расстояния между токоведущими частями и до заземленных элементов многократно сокращаются. В результате площадь, занимаемая КРУЭ, составляет всего 10–20 % от площади аналогичного ОРУ.

Для рассматриваемого в работе КРУЭ 110 кВ характерны следующие габаритные размеры модуля:

- высота – 3170 мм;
- длина – 11600 мм;
- ширина – 4825 мм.

Ячейки КРУЭ располагаются поперек помещения, а системы сборных шин проходят вдоль помещения горизонтально.

1.2. Элегаз как изоляционная и дугогасящая среда

Гексафторид серы (SF₆) является электроотрицательным газом, обладающим высокой электрической прочностью (примерно в 2–3 раза выше, чем у воздуха при том же давлении) и выдающейся способностью к гашению электрической дуги.

При размыкании контактов выключателя возникающая электрическая дуга гасится за счет интенсивного продольного или поперечного дутья. Турбулентное движение элегаза в зоне горения дуги обеспечивает быстрый отвод тепла и захват свободных электронов, что приводит к быстрой деионизации промежутка и восстановлению его диэлектрической прочности. Это позволяет надежно отключать как рабочие токи, так и токи короткого замыкания.



1.3. Конструктивные особенности КРУЭ 110 кВ

Конструкция КРУЭ зависит от класса напряжения. Важной особенностью КРУЭ на напряжение 110 кВ является то, что все три фазы

коммутационных аппаратов (включая выключатель) заключены в один общий заземленный металлический корпус (трехфазное исполнение).

Примечание: на более высоких классах напряжения (например, 220 кВ и выше) из-за увеличения габаритов и требований к изоляции каждая фаза, как правило, размещается в отдельном корпусе (однофазное исполнение).

Модульная конструкция КРУЭ предполагает, что каждая ячейка представляет собой законченный блок, полностью собранный, заполнен элегазом и испытанный в заводских условиях. Это не только гарантирует высокое качество сборки и герметичности, но и позволяет легко масштабировать распределительное устройство: при необходимости увеличения мощности или добавления новых линий можно оперативно смонтировать дополнительные типовые ячейки без значительных перерывов в электроснабжении и масштабных строительно-монтажных работ.

1.4. Основные элементы КРУЭ

В состав типовой ячейки КРУЭ 110 кВ, рассматриваемой в рамках виртуальной визуализации, входят следующие основные элементы, которые приведены в таблице 1.

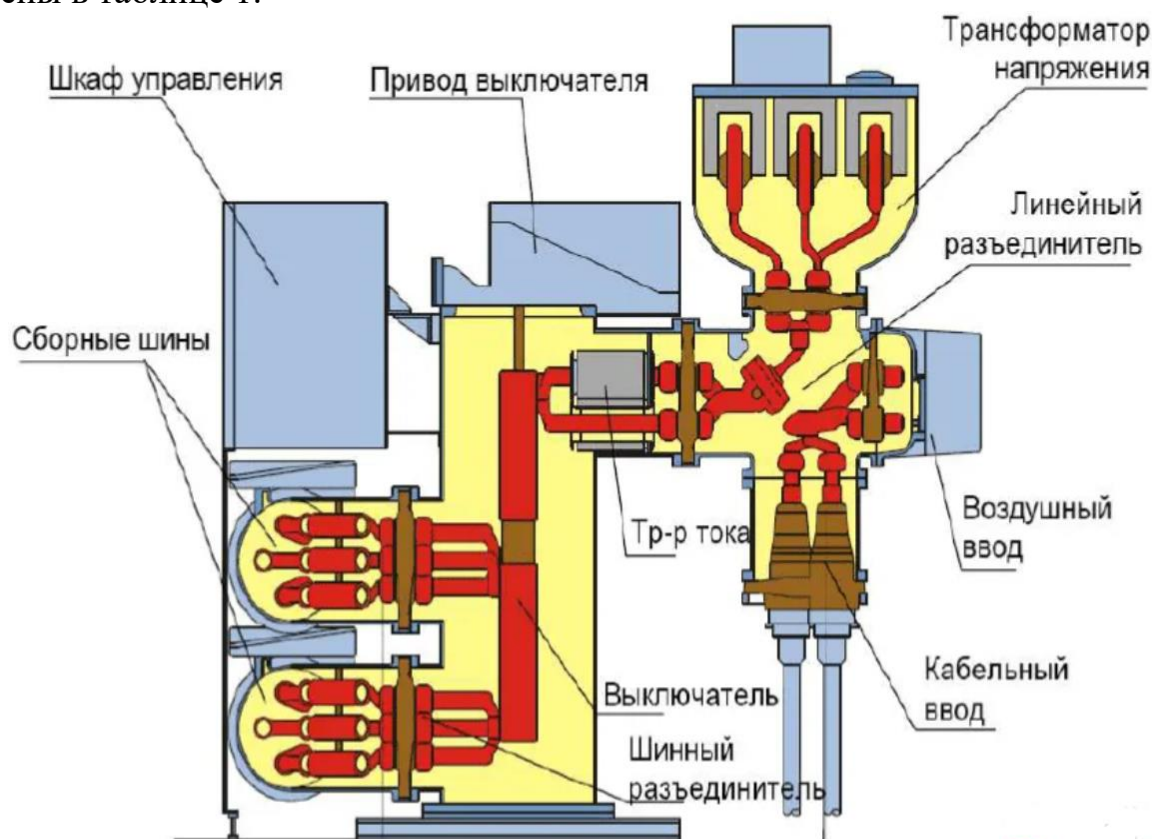


Рисунок 1 – Конструктивно-технологическая схема устройства КРУЭ 110 кВ.

Таблица 1 - Список основных элементов типовой ячейки КРУЭ 110 кВ.

№	Наименование элемента	Описание и назначение
1	Элегазовый выключатель 110 кВ	<p>Основной коммутационный аппарат, предназначенный для включения и отключения цепи в нормальных и аварийных режимах. Оснащен пружинным приводом, который обеспечивает необходимую скорость расхождения контактов и последующий взвод пружин для цикла «Отключение – Включение» (О-В).</p> <p>Гашение электрической дуги, возникающей при размыкании контактов, происходит в среде гексафторида серы (SF₆). Этот газ обладает высокой электрической прочностью и выдающимися дугогасящими свойствами: при расхождении контактов дуга гасится за счет интенсивного турбулентного продольного дутья элегазом, что обеспечивает быструю деионизацию дугового промежутка.</p>
2	Трансформаторы тока (ТТ)	<p>Устанавливаются последовательно с выключателем для снижения первичного тока до стандартных значений (1 А или 5 А), необходимых для питания цепей релейной защиты и автоматики (РЗА), а также измерительных приборов. На однолинейных схемах ТТ изображаются в трехфазном исполнении, так как количество фаз установки может варьироваться.</p>
3	Трансформаторы напряжения (ТН)	<p>Подключаются параллельно к шинам (через разъединитель) для снижения высокого напряжения до стандартного значения 100 В, используемого для питания вторичных цепей управления, защиты и измерений.</p>
4	Разъединители	<p>Коммутационные аппараты, предназначенные для создания видимого разрыва в обесточенной цепи после отключения выключателя. Видимый разрыв необходим для обеспечения</p>

		безопасности персонала, производящего осмотр и ремонт оборудования, так как позволяет визуально убедиться в обесточивании участка. Не предназначены для коммутации токов нагрузки.
5	Линейные заземлители	Коммутационные аппараты, предназначенные для надёжного заземления токоведущих частей отключённого электрооборудования (кабельных и воздушных линий, шин, трансформаторов) со стороны аппарата перед проведением ремонтных работ. Их главная задача — гарантировать безопасность персонала путём создания искусственного короткого замыкания на землю, что полностью исключает возможность поражения электрическим током при случайной подаче напряжения.
6	Шинопроводы	Герметичные оболочки (трубы или короба), содержащие системы сборных шин (в рассматриваемой схеме – две рабочие системы шин).
7	Шиносоединительный выключатель с разъединителем	Аппарат, устанавливаемый между двумя системами шин для их соединения, обеспечения резервирования или перевода присоединений с одной системы шин на другую без перерыва в питании.
8	Шкафы управления	Содержат мнемосхемы для визуального контроля положения коммутационных аппаратов, переключатели режимов управления (местное/дистанционное), индикацию состояния и элементы включения/отключения взаимоблокировок, предотвращающих ошибочные операции.
9	Кабельные подключения	Вводы для подключения силовых кабелей (в данном случае с изоляцией из сшитого полиэтилена – СПЭ). Обязательным элементом является шина заземления и проводники для заземления металлического экрана кабеля.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Шаг 1. Общий вид КРУЭ

1. После загрузки сценария в VR-гарнитуре внимательно осмотрите трёхмерное изображение КРУЭ 110 кВ, появившееся в поле зрения.

2. Убедитесь, что модель полностью помещается в поле зрения. Если КРУЭ не отображается или отображается частично, нажмите и удерживайте кнопку на манипуляторе для оцентровки положения взгляда.

3. Прослушайте вводную информацию преподавателя о помещении КРУЭ 110 кВ. Преподаватель пояснит, что вы находитесь в закрытом помещении, в котором размещено комплектное распределительное устройство, заполненное элегазом.

4. Обратите внимание на расположение отдельных ячеек — они располагаются **поперёк** помещения. Это важная особенность компоновки: ячейки ориентированы перпендикулярно продольной оси здания.

5. Запомните, что это комплектное распределительное устройство, заполненное элегазом. Все токоведущие части заключены в герметичные металлические оболочки, что обеспечивает высокую надёжность и безопасность эксплуатации.

6. Осмотрите общий вид оборудования: обратите внимание на компактность размещения, наличие шкафов управления с одной стороны и кабельных подключений — с другой.



Шаг 2. Геометрические размеры КРУЭ



1. Изучите инфографику, появившуюся в виртуальном пространстве: стрелками и надписями указаны размеры помещения и самого КРУЭ.

2. Запишите в отчет геометрические размеры КРУЭ:

- высота: 3170 мм;

- длина: 11600 мм;
- ширина: 4825 мм.

3. Изучите информационное окно сравнения площадей КРУЭ и ОРУ (открытого распределительного устройства, которое располагается на улице).

4. Запомните ключевой факт: площадь КРУЭ составляет всего 10–20 % от площади аналогичного ОРУ. Это главное преимущество комплектных распределительных устройств — их высокая компактность.

5. Обратите внимание, что ОРУ находится на улице и занимает значительные территории, тогда как КРУЭ размещается в закрытом помещении и позволяет эффективно использовать строительный объём.

6. Сопоставьте записанные размеры с реальным масштабом виртуальной модели: убедитесь, что модель КРУЭ в VR-среде соответствует своим натурным габаритам (масштаб близок к 1:1).

Шаг 3. Схема распределительного устройства

1. Изучите нормальную схему электрических соединений ТЭЦ, отображённую в виртуальном пространстве.

2. Найдите на схеме часть, выделенную **красным цветом** — это рассматриваемое КРУЭ 110 кВ.

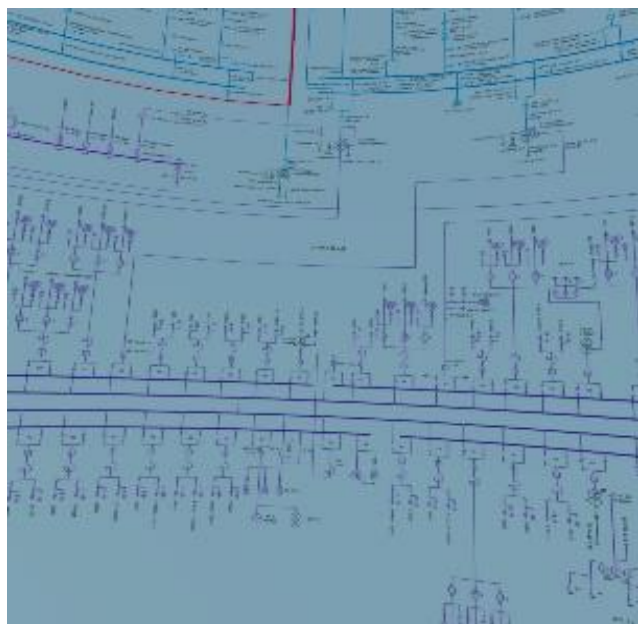
3. Определите, что представлена главная электрическая схема РУ с двумя рабочими системами сборных шин.

Данная схема обеспечивает высокую надёжность электроснабжения: при аварии или ремонте на одной системе шин присоединения могут быть переведены на другую без перерыва в питании.

4. Запомните, что далее будут рассматриваться участки РУ, выделенные красным цветом в соответствии с ячейками КРУЭ.

5. Обратите внимание на структуру схемы и взаимосвязь элементов:

- две горизонтальные линии в верхней части схемы — это две рабочие системы сборных шин;
- вертикальные ответвления — это присоединения (фидеры, трансформаторы, линии);
- между шинами расположен шиносоединительный выключатель.



6. Изучите остальные элементы схемы, не выделенные красным цветом, но входящие в общую структуру распределительного устройства ТЭЦ: силовые трансформаторы, линейные присоединения (фидеры), трансформаторы собственных нужд, измерительные трансформаторы, разъединители и линейные заземлители, реакторы и компенсирующие устройства.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №1

Отчёт по лабораторной работе должен быть выполнен в тетради для лабораторных работ или в электронном виде (формат А4) и содержать следующие разделы:

1. Титульный блок

Название работы: «Изучение устройства, компоновки и главных схем КРУЭ 110 кВ с использованием технологий VR-визуализации»

Дата выполнения: _____

ФИО студента, группа: _____

Цель работы: переписать из методических указаний

2. Геометрические размеры КРУЭ

Записать в отчёт конкретные размеры рассматриваемого модуля КРУЭ 110 кВ.

3. Соотношение площадей КРУЭ и ОРУ

Записать в отчёт сравнительную характеристику КРУЭ и ОРУ.

4. Главная электрическая схема РУ

Записать в отчёт:

- тип схемы;
- назначение схемы;
- основные элементы схемы.

5. Эскиз общей компоновки КРУЭ

Выполнить в отчёте схематичный эскиз (от руки или с использованием графического редактора) общего вида помещения КРУЭ 110 кВ. На эскизе обязательно отобразить и подписать:

- контуры помещения КРУЭ (прямоугольник);
- ячейки КРУЭ — расположены поперёк помещения (перпендикулярно продольной оси здания). Обозначить 4–6 типовых ячеек прямоугольниками;
- шинопроводы — две параллельные горизонтальные линии вдоль помещения (1-я и 2-я рабочие системы сборных шин);
- шкафы управления — расположены с одной стороны ячеек (фронтальная сторона). Обозначить прямоугольниками с надписью «ШУ»;
- кабельные подключения — расположены с противоположной стороны ячеек (тыльная сторона). Обозначить значками кабельных вводов;
- шиносоединительный выключатель (ШСВ) — расположен между двумя шинами в торцевой части РУ.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

Изучение шкафов управления, мнемосхем и оперативных схем КРУЭ 110 кВ с использованием VR-визуализации

Цель работы:

- изучить назначение, устройство и элементы лицевой панели шкафов управления КРУЭ;
- научиться «читать» мнемосхемы для определения текущего состояния коммутационных аппаратов и схемы их подключения;
- изучить элементы оперативного управления: переключатели режимов, сигнальную индикацию и системы взаимоблокировок;
- научиться сопоставлять физическое расположение аппаратов в виртуальной среде с их условными обозначениями на оперативной электрической схеме.

В ходе выполнения лабораторной работы студент должен:

- идентифицировать в трехмерном пространстве основные элементы ячейки КРУЭ 110 кВ: элегазовый выключатель, трансформаторы тока (ТТ) и напряжения (ТН), разъединители, линейные заземлители, шинопроводы и шкафы управления;
- сопоставлять физическое расположение и конструктивное исполнение оборудования в VR-модели с их условными графическими обозначениями на оперативных однолинейных электрических схемах и мнемосхемах;
- проанализировать главную электрическую схему РУ (две рабочие системы сборных шин) и понять роль шиносоединительного выключателя в обеспечении надежности электроснабжения;
- изучить принцип гашения электрической дуги в элегазе и назначение пружинного привода выключателя (наблюдая анимацию на шаге 20);
- уяснить строгую последовательность оперативных переключений при выводе оборудования в ремонт (отключение выключателя → отключение разъединителей → включение заземлителя).

Материально-техническое обеспечение

Наименование	Характеристики
Гарнитура виртуальной реальности	Meta Quest 3, автономный режим работы
Программное обеспечение	Приложение «KRUE», версия 1.0
Источник распространения ПО	Раздел «Неизвестные источники» (Unknown Sources)
Рабочая зона	Свободное пространство не менее 2×2 метра, закрытое помещение
Уровень заряда батареи	Не менее 50 %

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

2.1. Назначение и общее устройство шкафов управления КРУЭ

Шкаф управления КРУЭ — это специализированный электротехнический шкаф, устанавливаемый с фронтальной стороны каждой ячейки комплектного распределительного устройства и предназначенный для решения следующих задач:

- местное оперативное управление коммутационными аппаратами ячейки (выключателем, разъединителями, линейным заземлителем);
- контроль текущего состояния первичного оборудования через мнемосхему и световую индикацию;
- реализация защитных взаимоблокировок, предотвращающих ошибочные операции персонала;
- передача сигналов о положении аппаратов и аварийных ситуациях на удалённый диспетчерский пункт или в АСУ ТП;
- размещение аппаратуры вторичных цепей — реле защиты, автоматики, клеммные сборки, автоматические выключатели цепей управления.

Шкафы управления КРУЭ 110 кВ выполняются в металлическом заземлённом корпусе со степенью защиты не ниже IP54, что обеспечивает защиту от пыли и брызг воды. На лицевой панели размещаются органы управления и индикации, а внутри — аппаратура вторичных цепей, блоки реле и клеммники.

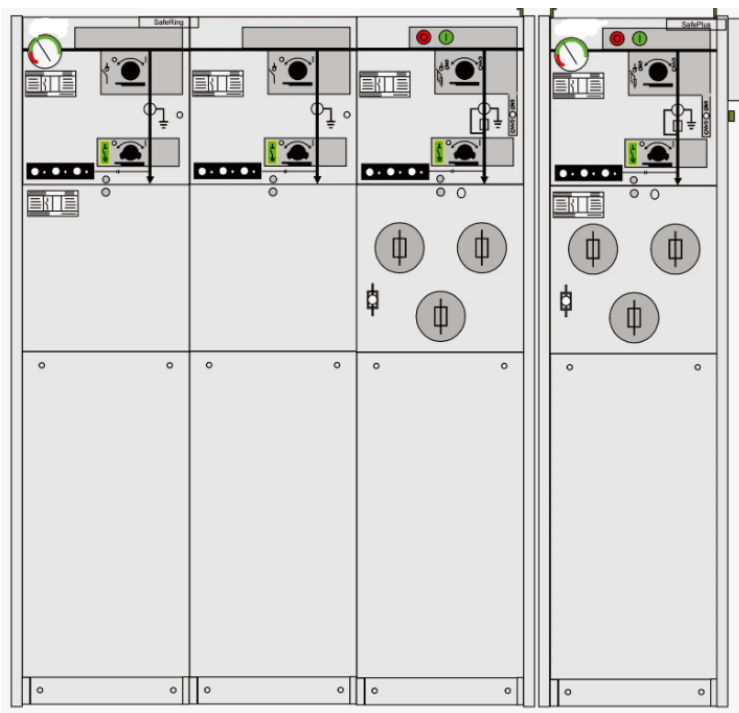


Рисунок 2 – Шкаф управления КРУЭ 110 кВ

Шкафы управления располагаются с фронтальной стороны каждой ячейки, ориентированной к проходу обслуживания. Над шкафами, в верхней части ячейки, размещаются приводы коммутационных аппаратов (электродвигательные или пружинные), которые механически связаны с разъединителями и заземлителями, расположенными внутри герметичных элегазовых оболочек.

2.2. Мнемосхема и индикация состояния

Мнемосхема — это упрощённое условное графическое изображение первичной электрической схемы присоединения, нанесённое на лицевую панель шкафа управления. Мнемосхема является основным инструментом визуального контроля для оперативного персонала.

Функциональное назначение мнемосхемы:

- отображение фактического положения коммутационных аппаратов (выключателей, разъединителей, заземлителей) в реальном времени;
- индикация принадлежности присоединения к конкретной системе сборных шин (1-й или 2-й);
- визуальное представление структуры присоединения: последовательность расположения выключателя, разъединителей, трансформаторов тока и кабельного подключения.

Принцип чтения мнемосхемы:

- мнемосхема читается слева направо и сверху вниз;
- в верхней части схемы изображаются две горизонтальные линии — это две рабочие системы сборных шин (1-я — нижняя, 2-я — верхняя);
- вертикальные ответвления — это присоединения (фидеры);
- цветовая индикация подключения к шине показывает, к какой системе шин подключено присоединение в данный момент (красный цвет — подключение активно);
- положение контактов аппаратов отображается условными графическими обозначениями по ГОСТ 2.702-2021.

Световая индикация состояния дополняет мнемосхему и предоставляет оперативную информацию:

- красная лампа — аппарат включён, цепь под напряжением;
- зелёная лампа — аппарат отключён;
- мигающая индикация — переходное состояние или срабатывание автоматики (АПВ, АВР);
- сигнальные табло — аварийные ситуации (срабатывание защиты, неисправность цепей управления, утечка элегаза).

2.3. Режимы управления: местное и дистанционное

Управление коммутационными аппаратами КРУЭ может осуществляться в одном из двух режимов, выбор которого производится с помощью переключателя режима управления, расположенного на лицевой панели шкафа.

Местное управление — режим, при котором команды на включение и отключение аппаратов подаются непосредственно с кнопок или переключателей, расположенных на лицевой панели шкафа управления данной ячейки.

Область применения:

- наладочные работы после монтажа или ремонта;
- проверка работоспособности приводов коммутационных аппаратов;
- проведение оперативных переключений при выводе оборудования в ремонт;
- аварийное управление при выходе из строя дистанционного канала управления;
- индивидуальное тестирование взаимоблокировок.

Особенности местного управления:

- оператор физически находится у шкафа управления и визуально контролирует положение аппаратов;
- команды подаются с удержанием кнопки (для предотвращения случайных срабатываний);
- перед включением местного режима необходимо убедиться в отсутствии персонала на оборудовании и в готовности приводов к работе.

Дистанционное управление — режим, при котором команды на коммутацию аппаратов передаются с удалённого пульта оперативного персонала (щита управления подстанции) или от автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП).

Область применения:

- повседневная эксплуатация КРУЭ в нормальном режиме;
- оперативные переключения по диспетчерским заявкам;
- автоматическое срабатывание устройств релейной защиты и автоматики (АПВ, АВР, АЧР);
- централизованное управление несколькими присоединениями с одного пульта.

Преимущества дистанционного управления:

- безопасность персонала — оператор находится на безопасном расстоянии от высоковольтного оборудования;

- быстродействие — команды передаются по электрическим или оптическим каналам связи за доли секунды;
- возможность интеграции с АСУ ТП и системами SCADA;
- централизованный учёт и протоколирование всех операций.

Переключатель режима управления — ключевой или поворотный переключатель на лицевой панели шкафа, имеющий два фиксированных положения:

- «**МЕСТНОЕ**» (или «**М**»);
- «**ДИСТАНЦИОННОЕ**» (или «**Д**»).

В нормальном эксплуатационном режиме переключатель должен находиться в положении «ДИСТАНЦИОННОЕ». Перевод в положение «МЕСТНОЕ» допускается только по распоряжению ответственного лица с записью в оперативном журнале.

2.4. Система взаимоблокировок

Взаимоблокировки — это комплекс электрических и механических защитных устройств, предназначенных для предотвращения ошибочных и опасных операций с коммутационными аппаратами, которые могут привести к тяжёлым авариям, поражению персонала электрическим током или разрушению оборудования.

Согласно требованиям ПОТЭЭ (Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок) и ПТЭ (Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей), **система взаимоблокировок должна предотвращать** следующие ошибочные операции:

– отключение или включение разъединителя под нагрузкой. Разъединитель не имеет дугогасительного устройства, и коммутация им токов нагрузки приведёт к возникновению устойчивой электрической дуги, междуфазному короткому замыканию и разрушению аппарата. Блокировка не позволяет оперировать разъединителем, пока включён соответствующий выключатель;

– включение разъединителя или выключателя на заземлённый участок. Если линейный заземлитель включён, подача напряжения приведёт к короткому замыканию на землю. Блокировка не позволяет включить разъединитель или выключатель, пока заземлитель находится во включённом положении;

– включение линейного заземлителя на участок под напряжением. Блокировка не позволяет включить заземлитель, пока разъединитель находится во включённом положении (т.е. на участке есть напряжение);

– вход в ячейку КРУЭ при наличии напряжения. Блокировка дверей шкафа управления и технологических лючков связана с положением разъединителей и заземлителей;

– одновременная подача команд из разных пунктов. Блокировка предотвращает одновременное управление одним аппаратом с местного и дистанционного постов.

Типы взаимоблокировок

По принципу действия:

– механические блокировки — реализованы через физические препятствия (рычаги, заслонки, замки), не позволяющие переместить привод в опасное положение;

– электрические блокировки — реализованы через вспомогательные контакты аппаратов, размыкающие цепи управления приводов при опасной комбинации положений;

– программные (логические) блокировки — реализованы в контроллерах АСУ ТП и шкафах управления через алгоритмы обработки команд.

По месту реализации:

– местные блокировки — действуют в пределах одной ячейки;

– групповые блокировки — координируют работу нескольких ячеек (например, блокировки при работе с шиносоединительным выключателем);

– общераспределительные блокировки — охватывают всё КРУЭ (например, блокировки при переводе присоединений с одной системы шин на другую).

На лицевой панели шкафа управления размещён специальный переключатель (или ключ), позволяющий временно отключить отдельные блокировки. Этот элемент предназначен исключительно для проведения специфических ремонтных, наладочных или режимных работ под строгим контролем ответственного лица.

Правила эксплуатации:

– в нормальном режиме переключатель должен находиться в положении «ВКЛЮЧЕНО»;

– отключение блокировок допускается только по письменному распоряжению технического руководителя;

– все операции с отключёнными блокировками фиксируются в оперативном журнале;

– после завершения работ блокировки должны быть немедленно восстановлены.

На шаге 9 демонстрации переключатель взаимоблокировок подсвечивается с текстовой подсказкой «Включение – выключение взаимоблокировок».

3.5. Переключатели состояния элементов и приводы аппаратов

На лицевой панели шкафа управления размещаются **переключатели состояния элементов** — органы оперативного управления, позволяющие вручную изменять положение отдельных коммутационных аппаратов ячейки.

Назначение:

- оперативное переключение присоединения с одной системы шин на другую;
- вывод оборудования в ремонт и возврат в работу;
- проведение поэлементных испытаний и проверок.

Правила эксплуатации:

- переключатели работают только при выборе местного режима управления;
- перед оперированием переключателем оператор обязан убедиться в допустимости операции по мнемосхеме и индикации;
- все операции фиксируются в оперативном журнале.

На шаге 10 демонстрации переключатели состояния элементов подсвечиваются с текстовой подсказкой «Переключатели состояния элементов».

Приводы элементов — это исполнительные механизмы, обеспечивающие механическое перемещение контактов коммутационных аппаратов (разъединителей, заземлителей). Приводы размещаются над шкафами управления, в верхней части ячейки, и механически связаны с аппаратами, находящимися внутри герметичных элегазовых оболочек.

Типы приводов, применяемых в КРУЭ 110 кВ:

- электродвигательные приводы — обеспечивают плавное и контролируемое перемещение ножей разъединителей, имеют встроенные концевые выключатели;
- пружинно-грузовые приводы — накапливают энергию в сжатых пружинах и обеспечивают быстрое срабатывание независимо от наличия оперативного тока;
- ручные приводы — применяются для резервного оперирования при выходе из строя основного привода.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Шаг 4. Изучение мнемосхемы шкафа управления

1. Нажмите кнопку «В» на правом манипуляторе для перехода к шагу 4.
2. Виртуальная камера автоматически переместится и сфокусируется на щите управления с мнемосхемой, расположенном с фронтальной стороны ячейки КРУЭ. Обратите внимание, что шкафы управления ориентированы лицевой панелью к проходу обслуживания — именно с этой стороны оперативный персонал осуществляет контроль и управление оборудованием.

3. На лицевой панели шкафа отобразится мнемосхема — упрощённое графическое изображение первичной электрической схемы присоединения, выполненное в виде контрастных светящихся линий. Внимательно осмотрите мнемосхему, «читая» её слева направо:

– **Первая ячейка:** обратите внимание на подключение к первой (нижней) системе сборных шин. Подключение визуально выделено **красным цветом** — это означает, что в данный момент присоединение активно подключено именно к этой шине.

– **Вторая ячейка:** подключение выполнено ко второй (верхней) системе сборных шин.



4. Запомните ключевую пространственную ориентацию:

– шины (две рабочие системы сборных шин) лежат горизонтально, слева направо, вдоль всего помещения КРУЭ;

– ячейки КРУЭ располагаются поперёк помещения, перпендикулярно осям шинопроводов.

5. Сопоставьте увиденную мнемосхему с общей компоновкой КРУЭ,

изученной на шаге 1: каждая ячейка имеет свой шкаф управления с индивидуальной мнемосхемой, отражающей состояние именно этого присоединения. Понимание этой взаимосвязи формирует у студента целостное пространственное представление о структуре распределительного устройства, где каждому физическому аппарату в ячейке соответствует своё условное обозначение на мнемосхеме. В дальнейшем, при выполнении оперативных переключений на реальном объекте, умение быстро «читать» мнемосхему позволит персоналу безошибочно определять текущий режим работы присоединения и контролировать правильность коммутации.

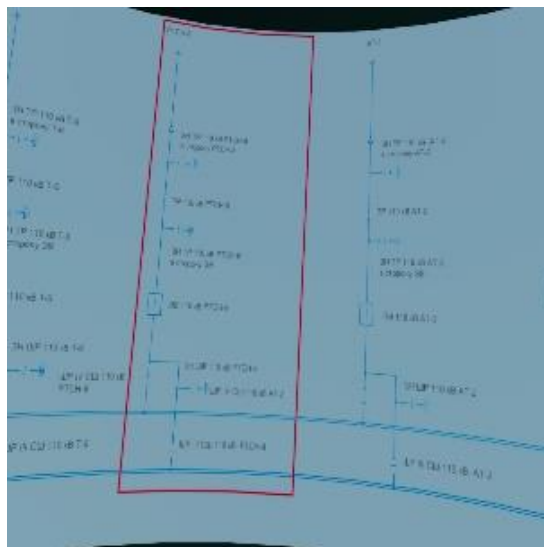
Шаг 5. Анализ оперативной схемы КРУЭ 110 кВ.

1. Нажмите кнопку «В» на правом манипуляторе для перехода к шагу 5.
2. В поле зрения появится увеличенное изображение оперативной электрической схемы КРУЭ 110 кВ, на которой цветом выделена рассматриваемая секция.

3. Найдите на схеме присоединение резервного трансформатора собственных нужд (РТСН).

4. Проанализируйте текущее состояние коммутационного аппарата ЭВ 110 кВ РТСН 8 (элегазовый выключатель), обращая внимание:

- выключатель подсоединен к 1-й (нижней) системе сборных шин (это обозначено вертикальной линией-перемычкой, идущей от выключателя к нижней горизонтальной шине);
- с двух сторон от выключателя разъединители находятся в замкнутом положении (на схеме изображены сплошными линиями, соединяющими цепь);
- заземляющие ножи, расположенные около разъединителей, не заземлены (разомкнуты, изображены с разрывом цепи).



5. Мысленно сопоставьте эту однолинейную схему с мнемосхемой, изученной на предыдущем шаге, убедившись в их полном визуальном и логическом соответствии.

Оперативная схема отражает *фактическое, реальное* положение коммутационных аппаратов в электроустановке в данный конкретный момент времени (в отличие от принципиальной схемы, которая показывает только проектное соединение элементов).

Вертикальная черта внутри условного графического обозначения выключателя на схеме всегда означает, что его главные контакты замкнуты, и цепь находится под рабочим напряжением.

Состояние заземляющих ножей: Тот факт, что заземляющие ножи разомкнуты, является нормой для рабочего режима. Согласно Правилам по охране труда при эксплуатации электроустановок (ПОТЭЭ), заземление включается только после полного отключения выключателя, отключения разъединителей (создания видимого разрыва) и проверки отсутствия напряжения. Включение заземления на участок под напряжением привело бы к тяжелому короткому замыканию.

Шаг 6. Идентификация мнемосхемы и индикации



1. Нажмите кнопку «В» на правом манипуляторе для перехода к шагу 6.

2. Виртуальная камера переместится к лицевой панели шкафа управления и сфокусируется на конкретной её зоне.

3. Система подсветит выделенную область, и в поле зрения появится текстовая подсказка: «Мнемосхема и индикация».

4. Внимательно осмотрите подсвеченную зону.

Обратите внимание на следующие элементы:

Мнемосхема — графическое изображение первичной цепи присоединения, выполненное в виде контрастных светящихся линий, повторяющих конфигурацию электрической схемы.

Световые индикаторы — сигнальные лампы или светодиоды, расположенные в непосредственной близости от мнемосхемы.

Цветовое кодирование — обратите внимание, что подключение к определённой системе шин выделено красным цветом, что соответствует информации, полученной на шаге 4.

5. Зафиксируйте в памяти, что именно в этой зоне оперативный персонал визуально контролирует:

- к какой из двух рабочих систем сборных шин (1-й нижней или 2-й верхней) в данный момент подключено данное присоединение;
- текущее положение коммутационных аппаратов (включено/отключено/заземлено);
- наличие или отсутствие напряжения на оборудовании.

6. Мысленно сопоставьте увиденную мнемосхему с оперативной схемой, изученной на шаге 5: они должны полностью соответствовать друг другу по конфигурации и состоянию аппаратов.

Мнемосхема на шаге 6 должна полностью соответствовать оперативной схеме, изученной на шаге 5. Если на оперативной схеме выключатель ЭВ 110 кВ РТСН 8 показан включённым и подключённым к 1-й шине, то и на мнемосхеме должно отображаться аналогичное состояние. Любое расхождение между мнемосхемой и оперативной схемой является признаком неисправности цепей индикации и требует немедленного выяснения причин.

Шаг 7. Изучение переключателя режима управления



1. Нажмите кнопку «В» на правом манипуляторе для перехода к шагу 7.

2. Виртуальная камера переместится к лицевой панели шкафа управления и сфокусируется на поворотном ключе или переключателе.

3. Система подсветит данный элемент, и в поле зрения появится текстовая подсказка: **«Переключатель режима управления (местное и дистанционное)»**.

4. Внимательно осмотрите переключатель. Обратите внимание на его два фиксированных положения, обычно обозначенных буквами «М» (местное) и «Д» (дистанционное).

5. Зафиксируйте, что именно этот переключатель определяет источник команд на электромагнитные или моторные приводы коммутационных аппаратов ячейки.

Переключатель режима управления — это ключевой орган управления на лицевой панели шкафа, определяющий, откуда будут поступать команды на включение и отключение коммутационных аппаратов присоединения.

Режим «Местное» (М):

– Управление осуществляется непосредственно с кнопок или переключателей, расположенных на данном шкафу.

– Применяется исключительно в следующих случаях:

1. наладочные работы после монтажа или ремонта;
2. проверка работоспособности приводов коммутационных аппаратов;
3. проведение оперативных переключений при выводе оборудования в ремонт;
4. аварийное управление при отказе дистанционного канала;
5. индивидуальное тестирование взаимоблокировок.

В этом режиме команды с диспетчерского пульта аппаратно блокируются.

Оператор физически находится у шкафа и визуально контролирует положение аппаратов.

Режим «Дистанционное» (Д):

Управление осуществляется с центрального пульта оперативного персонала или от автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП).

Это основной, нормальный режим эксплуатации КРУЭ, который обеспечивает:

- безопасность персонала (удалённость от высоковольтного оборудования);
- быстрдействие (команды передаются за доли секунды);
- возможность интеграции с АСУ ТП и системами SCADA;
- централизованный учёт и протоколирование всех операций.

Важное правило эксплуатации: В нормальном режиме переключатель должен находиться в положении «ДИСТАНЦИОННОЕ». Перевод в положение «МЕСТНОЕ» допускается **только по распоряжению ответственного лица** с обязательной записью в оперативном журнале.

Шаг 8. Изучение индикации состояния



1. Нажмите кнопку «В» для перехода к шагу 8.

2. Подсветка укажет на зону сигнальных ламп, светодиодов или цифровых индикаторов на лицевой панели.

3. Прочитайте подсказку: «Индикация состояния».

4. Определите расположение индикаторов и обратите внимание на их цветовую маркировку.

5. Запомните стандартную цветовую

кодировку светосигнальной арматуры:

Красный цвет — аппарат включён, цепь замкнута, оборудование под напряжением;

Зелёный цвет — аппарат отключён, цепь разомкнута;

Мигающий сигнал (белый или жёлтый) — переходный процесс, срабатывание автоматики (АПВ, АВР) или неисправность цепей управления;

Сигнальные табло — аварийные ситуации (срабатывание защиты, утечка элегаза, неисправность приводов).

6. Сопоставьте показания индикации с мнемосхемой, изученной на шагах 4 и 6: они должны полностью соответствовать друг другу.

Светосигнальная арматура (индикация состояния) — это первичный источник оперативной информации для персонала, работающего у ячейки. Индикаторы дублируют информацию мнемосхемы и предоставляют дополнительные сведения о режиме работы оборудования.

Типы индикаторов, применяемых в КРУЭ:

- лампы накаливания или светодиоды — для сигнализации положения выключателей и разъединителей;
- цифровые табло — для отображения значений тока, напряжения, мощности;
- сигнальные реле с флажками — для фиксации срабатывания защит;
- аварийные табло — для оповещения о критических ситуациях (утечка элегаза, перегрев, неисправность приводов).

Индикация формируется от **вспомогательных контактов** коммутационных аппаратов. Когда главные контакты выключателя замыкаются, соответствующий вспомогательный контакт замыкает цепь красной лампы. При отключении — цепь зелёной лампы. Это обеспечивает достоверное отображение фактического положения аппарата, а не только команды на его управление.

Важное правило: Любое расхождение между показаниями индикации, мнемосхемы и оперативной схемы является признаком неисправности цепей индикации (обрыв, замыкание, неисправность вспомогательных контактов) и требует немедленного выяснения причин. До устранения неисправности любые переключения с данным присоединением запрещены.

Шаг 9. Изучение системы взаимоблокировок

1. Нажмите кнопку «В» для перехода к шагу 9.
2. Подсветка выделит соответствующие ключи, переключатели или кнопки с защитными колпачками.
3. Прочитайте подсказку: «Включение – выключение взаимоблокировок».



4. Осмотрите переключатель (или ключ) и его положения. Уясните его критическую важность для безопасности эксплуатации.

5. Запомните: в нормальном режиме переключатель должен находиться в положении «ВКЛЮЧЕНО».

Взаимоблокировки — это комплекс

электрических и механических защитных устройств, предназначенных для предотвращения ошибочных и смертельно опасных операций с коммутационными аппаратами.

Согласно требованиям ПОТЭЭ (Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок) и ПТЭ (Правила технической эксплуатации), система взаимоблокировок должна предотвращать следующие ошибочные операции:

– отключение или включение разъединителя под нагрузкой. Разъединитель не имеет дугогасительного устройства, и коммутация им токов нагрузки приведёт к возникновению устойчивой электрической дуги, междуфазному короткому замыканию и разрушению аппарата. Блокировка не позволяет оперировать разъединителем, пока включён соответствующий выключатель;

– включение разъединителя или выключателя на заземлённый участок. Если линейный заземлитель включён, подача напряжения приведёт к короткому замыканию на землю. Блокировка не позволяет включить разъединитель или выключатель, пока заземлитель находится во включённом положении;

– включение линейного заземлителя на участок под напряжением. Блокировка не позволяет включить заземлитель, пока разъединитель находится во включённом положении;

– вход в ячейку КРУЭ при наличии напряжения. Блокировка дверей шкафа управления и технологических лючков связана с положением разъединителей и заземлителей;

– одновременная подача команд из разных пунктов. Блокировка предотвращает одновременное управление одним аппаратом с местного и дистанционного постов.

Типы взаимоблокировок:

Механические блокировки — реализованы через физические препятствия (рычаги, заслонки, замки);

Электрические блокировки — реализованы через вспомогательные контакты аппаратов, размыкающие цепи управления при опасной комбинации;

Программные (логические) блокировки — реализованы в контроллерах АСУ ТП через алгоритмы обработки команд.

Переключатель включения-выключения взаимоблокировок — специальный элемент на лицевой панели, позволяющий временно отключить отдельные блокировки. Он предназначен исключительно для проведения специфических ремонтных, наладочных или режимных работ под строгим контролем ответственного лица.

Правила эксплуатации:

- в нормальном режиме переключатель должен находиться в положении «ВКЛЮЧЕНО»;
- отключение блокировок допускается только по письменному распоряжению технического руководителя;
- все операции с отключёнными блокировками фиксируются в оперативном журнале;
- после завершения работ блокировки должны быть немедленно восстановлены.

Шаг 10. Изучение переключателей состояния элементов

1. Нажмите кнопку «В» для перехода к шагу 10.



2. Подсветка укажет на группу тумблеров, кнопок или поворотных переключателей.

3. Прочитайте подсказку: «Переключатели состояния элементов».

4. Осмотрите их. Поймите, что эти органы управления используются оперативным персоналом для ручного изменения состояния конкретных аппаратов (например, для перевода присоединения с 1-й шины на 2-ю).

5. Запомните: данные переключатели работают только при условии, что на шаге 7 переключатель режима управления был переведён в положение «Местное», и при этом не сработают цепи взаимоблокировок (шаг 9), если запрошенная операция недопустима. При переводе переключателя в положение «Включить» или «Отключить» формируется электрическая команда на соответствующий привод. Однако эта команда достигнет привода только при соблюдении трёх условий:

- переключатель режима управления (шаг 7) находится в положении «Местное»;
- система взаимоблокировок (шаг 9) **не блокирует** данную операцию;
- привод аппарата исправен и готов к работе (имеется оперативный ток, пружины взведены).

Типичные операции, выполняемые через переключатели состояния:

1. Перевод присоединения с одной системы шин на другую:

- отключить выключатель;
- отключить разъединитель от текущей шины;
- включить разъединитель к другой шине;

- включить выключатель.
- 2. Вывод присоединения в ремонт:
 - отключить выключатель;
 - отключить линейный разъединитель;
 - отключить шинный разъединитель;
 - включить линейный заземлитель.

3. Ввод присоединения в работу — в обратной последовательности.

Важное правило: Все операции с переключателями состояния элементов фиксируются в оперативном журнале с указанием времени, характера операции и ФИО оператора. Это обеспечивает прослеживаемость действий и расследование возможных инцидентов.

Шаг 11. Изучение приводов элементов



1. Нажмите кнопку «В» на правом манипуляторе для перехода к шагу 11.

2. Виртуальная камера переместится в верхнюю часть ячейки КРУЭ, над шкафами управления.

3. Система подсветит красным цветом приводы элементов — исполнительные механизмы, расположенные над шкафами управления.

4. В поле зрения появится текстовая подсказка: **«Приводы элементов»**.

5. Внимательно осмотрите приводы. Обратите внимание на:

- их расположение — непосредственно над лицевой панелью шкафа управления;

- механическую связь с коммутационными аппаратами (разъединителями и заземлителями), находящимися внутри герметичных элегазовых оболочек;

- наличие электродвигателей, редукторов или пружинных механизмов в конструкции привода;

- кабельные соединения, подводящие оперативный ток к двигателю привода.

6. Мысленно сопоставьте увиденные приводы с переключателями состояния элементов, изученными на шаге 10: именно эти приводы получают команды от переключателей и физически перемещают ножи аппаратов.

Привод элемента — это исполнительный механизм, преобразующий электрическую команду управления в механическое перемещение главных контактов или ножей коммутационного аппарата. В КРУЭ 110 кВ приводы обеспечивают оперирование разъединителями и линейными заземлителями, которые физически расположены внутри герметичных металлических оболочек, заполненных элегазом, и недоступны для прямого ручного воздействия.

Типы приводов, применяемых в КРУЭ:

Тип привода	Принцип действия	Область применения
Электродвигательный	Электрический двигатель через редуктор передаёт вращение на вал привода разъединителя	Основной тип для оперирования разъединителями в нормальном режиме
Пружинно-грузовой	Энергия накапливается в сжатых пружинах (взвод — от электродвигателя или вручную) и высвобождается при срабатывании	Для быстродействующих аппаратов, не зависящих от наличия оперативного тока
Ручной (резервный)	Механизм с рукояткой или штурвалом для оперирования при отказе основного привода	Аварийное оперирование, наладочные работы
Пневматический	Использует сжатый воздух для перемещения контактов	В специализированных исполнениях КРУЭ

Конструктивные особенности приводов КРУЭ:

1. **Герметичный ввод движения:** вал привода проходит через герметичную оболочку ячейки через специальные уплотнения (сильфоны или манжетные уплотнения), сохраняя герметичность элегазовой среды.

2. **Концевые выключатели:** в приводе установлены концевые выключатели, фиксирующие крайние положения ножей («включено»/«отключено») и формирующие сигналы для мнемосхемы и индикации (шаг 8).

3. **Блокировочные контакты:** вспомогательные контакты привода участвуют в работе цепей взаимоблокировок (шаг 9), предотвращая опасные операции.

4. **Местный указатель положения:** на корпусе привода имеется механический указатель («флажок»), позволяющий визуально определить фактическое положение аппарата при осмотре с лестницы или площадки.

Логическая цепочка управления (связь с шагами 4–10):

– Оператор принимает решение о переключении (по мнемосхеме — шаг б).

– Переводит переключатель режима в положение «Местное» (шаг 7).

– Подаёт команду через переключатель состояния элемента (шаг 10).

– Электрический сигнал поступает на привод (шаг 11).

– Привод преобразует электрическую энергию в механическое движение.

– Ножи разъединителя или заземлителя перемещаются внутри герметичной оболочки.

– Концевые выключатели привода фиксируют новое положение и обновляют индикацию на мнемосхеме.

Нормативные требования к приводам:

– приводы должны обеспечивать надёжное оперирование аппаратами при отклонениях напряжения оперативного тока в пределах 85–110 % от номинального;

– время срабатывания привода строго нормировано и должно обеспечивать необходимую скорость перемещения ножей;

– все приводы должны быть оснащены системой блокировки от несанкционированного доступа и защитой от коррозии.

Шаг 11 является логическим завершением большого блока изучения шкафов управления (шаги 4–11), на котором студент должен увидеть полную картину взаимодействия человека и оборудования:

Оператор → Мнемосхема (контроль) → Переключатель режима → Переключатель состояния → Привод → Механическое перемещение контактов → Обновление индикации.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №2

Отчёт по лабораторной работе должен быть выполнен в тетради для лабораторных работ или в электронном виде (формат А4) и содержать следующие разделы:

1. Титульный блок

Название работы: «Изучение шкафов управления, мнемосхем и оперативных схем КРУЭ 110 кВ с использованием VR-визуализации».

Дата выполнения: _____

ФИО студента, группа: _____

Цель работы: переписать из методических указаний.

2. Анализ оперативной схемы КРУЭ 110 кВ (по Шагу 5)

Студент должен зафиксировать в отчёте состояние конкретного присоединения, рассмотренного в виртуальной среде:

- наименование присоединения;
- положение выключателя;
- подключение к шинам;
- положение разъединителей;
- положение заземляющих ножей;
- эскиз фрагмента оперативной схемы: выполнить от руки условное графическое изображение данного участка цепи (выключатель, два разъединителя, заземлители, подключение к 1-й шине) с использованием стандартных обозначений по ГОСТ.

3. Решить и обосновать ситуационную задачу

Задача №1. Почему в нормальном режиме переключатель взаимоблокировок должен находиться в положении «ВКЛЮЧЕНО»?

Задача №2. Может ли оператор нажать кнопку «Отключить» на самом шкафу, если переключатель режимов стоит в положении «Дистанционное»?

4. Приводы коммутационных аппаратов (по Шагу 11)

- место расположения;
- назначение;
- тип привода.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

Изучение кабельных подключений и системы заземления КРУЭ 110 кВ с использованием VR-визуализации

Цель работы:

- изучить конструкцию силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ), применяемых для подключений в КРУЭ 110 кВ;
- познакомиться с системой заземления КРУЭ: шиной заземления, проводниками заземления корпусов оборудования и заземлением экранов кабелей;
- научиться сопоставлять физическое расположение кабельных подключений и элементов заземления в виртуальной модели с их отображением на оперативной электрической схеме;
- сформировать понимание требований электробезопасности к заземлению высоковольтного оборудования.

В ходе выполнения лабораторной работы студент должен:

- идентифицировать в VR-среде (шаги 12–16) кабельные подключения, шину заземления и проводники заземления экранов и корпусов, сопоставляя их физическое расположение в помещении КРУЭ с отображением на оперативной электрической схеме;
- знать конструкцию силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) класса 110 кВ: токопроводящая жила, полупроводящие экраны, изоляция СПЭ, металлический экран, разделительный слой и защитная оболочка;
- проанализировать состав и назначение системы заземления КРУЭ (магистраль заземления, проводники заземления корпусов и экранов кабелей) с учётом нормативных требований ПУЭ и ПОТЭЭ;
- знать условные графические обозначения кабельных линий и элементов заземления на однолинейных оперативных электрических схемах.

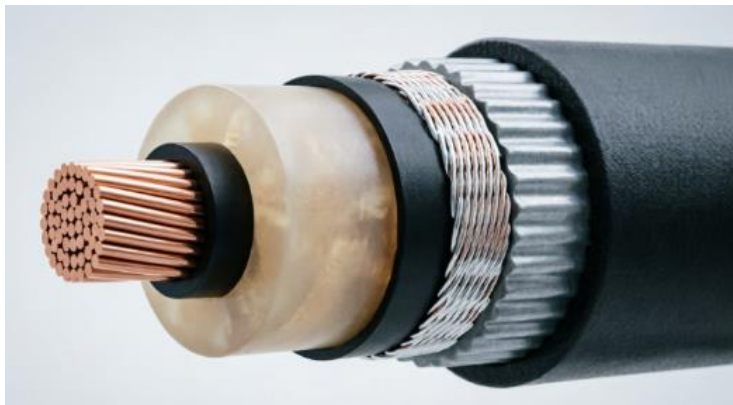
Материально-техническое обеспечение

Наименование	Характеристики
Гарнитура виртуальной реальности	Meta Quest 3, автономный режим работы
Программное обеспечение	Приложение «KRUE», версия 1.0
Источник распространения ПО	Раздел «Неизвестные источники» (Unknown Sources)
Рабочая зона	Свободное пространство не менее 2×2 метра, закрытое помещение
Уровень заряда батареи	Не менее 50 %

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

3.1. Кабельные подключения КРУЭ 110 кВ

Для подключений в КРУЭ 110 кВ применяются силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ).



На изображении детально проработана структура кабеля в разрезе, соблюдая указанную последовательность слоев от центра к периферии:

- токопроводящая жила из медных проволок;
- внутренний полупроводниковый экран;
- изоляция из XLPE (светлый слой);
- внешний полупроводниковый экран;
- металлический экран (медные проволоки);
- металлическая оболочка (гофрированная, серого цвета);
- внешняя защитная оболочка (черная, из полиэтилена или ПВХ).

Преимущества кабелей СПЭ перед традиционными кабелями с бумажно-масляной изоляцией:

- высокая допустимая температура жилы (до 90 °С в нормальном режиме и до 250 °С в режиме короткого замыкания);
- отсутствие необходимости в обслуживании в течение всего срока службы (до 30 лет);
- малый вес и гибкость, удобство монтажа;
- высокая надёжность и стойкость к внешним воздействиям.

3.2. Назначение и заземление металлического экрана кабеля

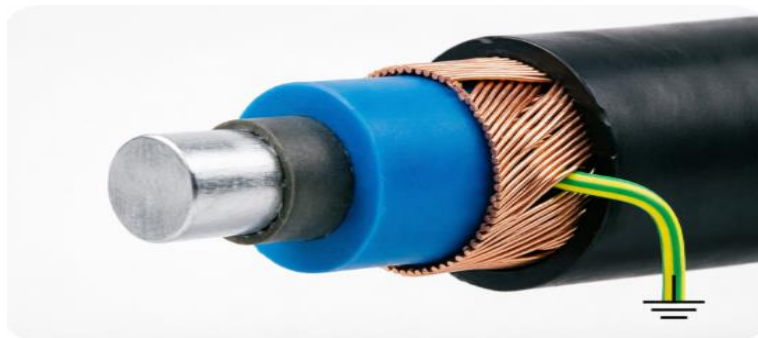
Металлический экран кабеля является обязательным элементом конструкции высоковольтного кабеля.

Заземление экрана кабеля необходимо по следующим причинам:

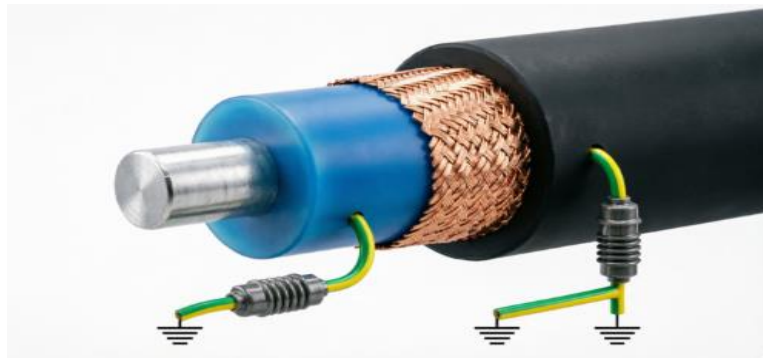
- электробезопасность персонала — при повреждении основной изоляции ток замыкания на землю стекает через экран и заземляющий проводник;
- корректная работа релейной защиты — устройства защиты от замыканий на землю (трансформаторы тока нулевой последовательности) фиксируют ток, протекающий через заземлённый экран;
- отвод емкостных токов — в рабочем режиме по экрану протекают емкостные токи, которые должны быть отведены в землю;
- симметрирование электрического поля — заземлённый экран обеспечивает равномерное распределение электрического поля вокруг жилы кабеля.

Способы заземления экранов высоковольтных кабелей:

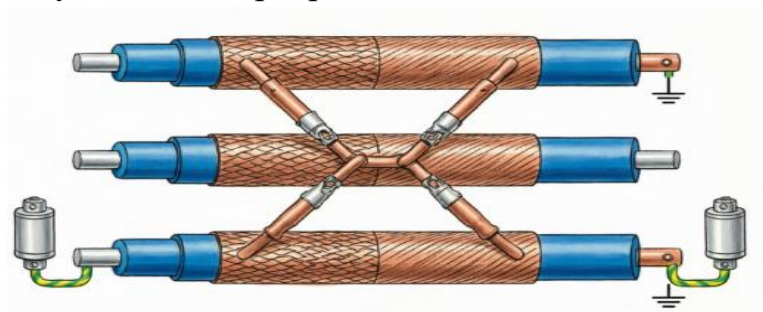
- одностороннее заземление — применяется для кабелей небольшой протяжённости (до 100 м);



- двустороннее заземление — применяется для кабелей большой протяжённости, с установкой ограничителей перенапряжений (ОПН);



- секционирование экрана — для очень длинных кабелей с разделением экрана на участки и перекрёстным соединением.



3.3. Система заземления КРУЭ 110 кВ

Система заземления КРУЭ включает следующие основные элементы:

1. Шина заземления (магистраль заземления) — медная или стальная полоса, проложенная вдоль всего КРУЭ и соединённая с общим заземляющим контуром подстанции. Является основным элементом системы уравнивания потенциалов;



2. Проводники заземления металлических корпусов — соединения металлических корпусов ячеек, шинопроводов, приводов и шкафов управления с шиной заземления. Обеспечивают защитное заземление нетоковедущих частей;



3. Проводники заземления экранов кабелей — обязательное соединение металлического экрана каждого кабеля с шиной заземления через специальные муфты или зажимы.



3.4. Нормативные требования к системе заземления

Согласно ПУЭ и ПОТЭЭ:

- все металлические нетоковедущие части электроустановок должны быть надёжно заземлены;
- экраны кабелей должны быть заземлены в обязательном порядке;
- сопротивление заземляющего устройства КРУЭ 110 кВ не должно превышать 0,5 Ом.

Требования к заземляющим проводникам:

- материал: медь сечением не менее 25 мм² или сталь сечением не менее 100 мм²;
- соединения выполняются сваркой или болтовыми соединениями с использованием пружинных шайб;
- маркировка: жёлто-зелёная окраска изоляции или бирки с обозначением «РЕ»;
- проводники должны быть доступны для осмотра и не должны быть окрашены (кроме мест болтовых соединений).

3.5. Функции системы заземления КРУЭ

Система заземления обеспечивает:

- электробезопасность персонала — при повреждении изоляции и появлении напряжения на корпусе ток стекает по заземляющему проводнику в землю, не представляя опасности для человека;
- корректную работу релейной защиты — при замыкании на землю возникает ток, который фиксируется устройствами защиты;
- защиту от наведённых напряжений — особенно важно для кабелей большой протяжённости, проходящих вблизи действующих ВЛ;
- отвод статических зарядов — возникающих на металлических частях оборудования;
- уравнивание потенциалов — устранение разности потенциалов между различными металлическими частями оборудования.

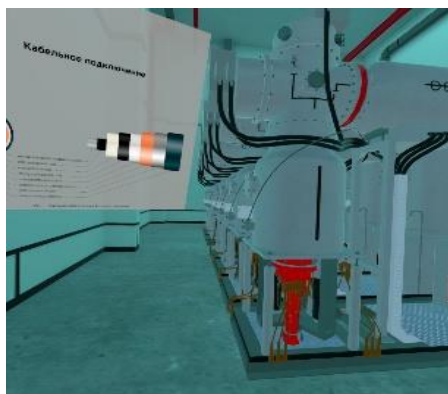
!ВАЖНО!

Заземление является обязательным, а не рекомендуемым мероприятием.

Запрещается эксплуатация оборудования без подключённого заземления.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Шаг 12. Изучение кабельного подключения



1. Нажмите кнопку «В» на правом манипуляторе для перехода к шагу 12.

2. Виртуальная камера переместится на тыльную сторону ячеек КРУЭ — туда, где располагаются кабельные подключения.

3. Система подсветит красным цветом кабельное подключение. Внимательно осмотрите его.

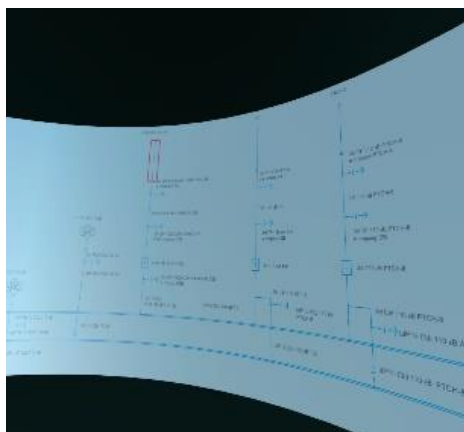
4. Слева в поле зрения появится инфографика с конструкцией кабеля — послойное изображение кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ).

5. Изучите конструкцию кабеля, обращая внимание на:

- центральную токопроводящую жилу;
- слой изоляции из сшитого полиэтилена;
- полупроводящие экраны по жиле и по изоляции;
- металлический экран из медных проволок (ключевой элемент для заземления);
- внешнюю защитную оболочку.

6. Запомните, что кабель соединяет ячейку КРУЭ с внешним оборудованием (силовым трансформатором, другой подстанцией или распределительным пунктом).

Шаг 13. Оперативная схема кабельного подключения



1. Нажмите кнопку «В» для перехода к шагу 13.

2. В поле зрения появится оперативная электрическая схема КРУЭ 110 кВ.

3. Найдите на схеме участок, выделенный красным цветом — это рассматриваемое кабельное подключение.

4. Определите место кабеля в общей структуре присоединения:

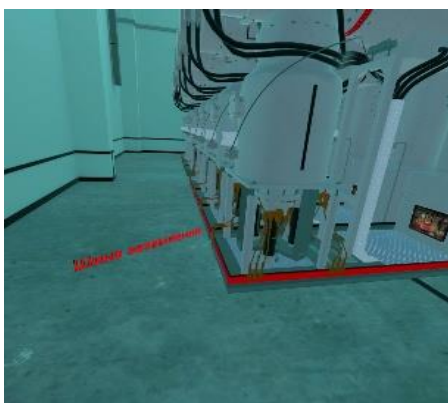
- кабель подключается после линейного разъединителя и линейного заземлителя;

- кабель отходит от ячейки КРУЭ к внешнему оборудованию.

5. Сопоставьте расположение кабеля на схеме с его физическим положением в виртуальной модели, изученным на шаге 12.

На однолинейной оперативной схеме кабельное присоединение обозначается условным графическим знаком (обычно в виде прямоугольника или обозначения «W» с указанием марки и сечения кабеля). Кабель является конечным элементом присоединения, через который электрическая энергия передаётся от КРУЭ к потребителю или другому распределительному устройству.

Шаг 14. Изучение шины заземления



1. Нажмите кнопку «В» для перехода к шагу 14.
2. Система подсветит красным цветом шину заземления, проложенную вдоль КРУЭ.
3. Внимательно осмотрите шину заземления. Обратите внимание на:

- материал шины (обычно медная или стальная полоса);
- места её крепления к строительным

конструкциям;

- точки подключения к ней заземляющих проводников от корпусов оборудования и экранов кабелей.

4. Появится текстовая подсказка: «**Шина заземления**».

5. Запомните, что шина заземления соединяет все заземляемые элементы КРУЭ с общим заземляющим контуром подстанции.

Шина заземления — это основной элемент системы уравнивания потенциалов в КРУЭ. Она обеспечивает:

- электробезопасность персонала — при повреждении изоляции и появлении напряжения на корпусе, ток стекает по заземляющему проводнику в землю, не представляя опасности для человека;
- корректную работу релейной защиты — при замыкании на землю возникает ток, который фиксируется устройствами защиты;
- защиту от наведённых напряжений — особенно важно для кабелей большой протяжённости, проходящих вблизи других ВЛ;
- отвод статических зарядов — возникающих на металлических частях оборудования.

Шаг 15. Изучение проводников заземления экрана кабеля



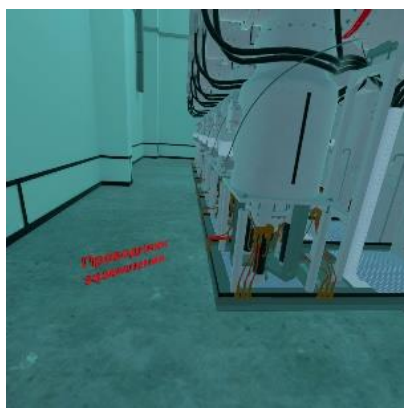
1. Нажмите кнопку «В» для перехода к шагу 15.
2. Система подсветит проводники заземления экрана кабеля — медные жилы, соединяющие металлический экран кабеля с шиной заземления.
3. Внимательно осмотрите их. Обратите внимание на:

- место подключения проводника к металлическому экрану кабеля (обычно через специальную муфту или зажим);
- место подключения проводника к шине заземления;
- сечение проводника (обычно не менее 25 мм² меди).

4. Появится текстовая подсказка: «**Заземление экрана кабеля**».

5. Запомните, что заземление экрана кабеля — обязательное требование ПУЭ и ПОТЭЭ.

Шаг 16. Изучение проводников заземления корпусов



1. Нажмите кнопку «В» для перехода к шагу 16.
2. Система подсветит проводники заземления — медные или стальные жилы, соединяющие металлические корпуса оборудования КРУЭ (ячейки, шинопроводы, приводы, шкафы управления) с шиной заземления.
3. Внимательно осмотрите их. Обратите внимание на:

- места подключения проводников к корпусам оборудования (обычно через специальные болтовые зажимы);
- места подключения проводников к шине заземления;
- маркировку заземляющих проводников (обычно жёлто-зелёная окраска изоляции или бирки с обозначением «РЕ»).

4. Появится текстовая подсказка: «**Проводники заземления**».

5. Запомните, что заземление всех металлических нетоковедущих частей — обязательное требование электробезопасности.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №3

Отчёт по лабораторной работе должен быть выполнен в тетради для лабораторных работ или в электронном виде (формат А4) и содержать следующие разделы:

1. Титульный блок

Название работы: «Изучение кабельных подключений и системы заземления КРУЭ 110 кВ с использованием VR-визуализации».

Дата выполнения: _____

ФИО студента, группа: _____

Цель работы: переписать из методических указаний.

2. Конструкция кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) (по Шагу 12)

Студент должен отразить в отчёте:

- тип кабеля;
- эскиз конструкции кабеля выполнить от руки послойное изображение конструкции кабеля с обозначением основных элементов;
- назначение металлического экрана кабеля: указать не менее трёх функций.

3. Система заземления КРУЭ (по Шагам 14–16)

Студент должен заполнить сводную таблицу элементов системы заземления:

№	Элемент заземления (шаг VR)	Назначение элемента	Требования (материал, сечение, сопротивление)
1	Шина заземления (Шаг 14)	Основная магистраль системы уравнивания потенциалов	Медь/сталь, сопротивление заземляющего устройства $\leq 0,5$ Ом
2	...		
3	...		

4. Решить и обосновать ситуационные задачи

Задача №1. Что произойдёт, если заземление экрана кабеля будет нарушено (обрыв проводника)? Обоснуйте последствия для безопасности персонала; работы релейной защиты; состояния изоляции кабеля.

Задача №2. Почему максимально допустимое сопротивление заземляющего устройства КРУЭ 110 кВ не должно превышать 0,5 Ом? Обоснуйте с точки зрения: электробезопасности персонала; корректной работы устройств релейной защиты от замыканий на землю.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

Изучение элегазового выключателя 110 кВ и трансформаторов тока с использованием VR-визуализации

Цель работы:

- изучить конструкцию и принцип действия элегазового выключателя 110 кВ, включая процесс гашения электрической дуги в среде гексафторида серы (SF₆);
- ознакомиться с устройством и назначением пружинного привода выключателя;
- изучить назначение, конструкцию и схему подключения трансформаторов тока (ТТ) в цепях релейной защиты и автоматики;
- научиться сопоставлять физическое расположение выключателя и трансформаторов тока в виртуальной модели с их отображением на оперативной электрической схеме и схеме РЗА.

В ходе выполнения лабораторной работы студент должен:

- идентифицировать в VR-среде (шаги 17–24) элегазовый выключатель, его пружинный привод и трансформаторы тока;
- анализировать анимацию срабатывания выключателя (шаг 20), описывая последовательность процесса гашения дуги;
- определять по оперативной схеме положение выключателя (включен/отключен) и разъединителей;
- сопоставлять физическое расположение выключателя и ТТ в виртуальной модели КРУЭ с их отображением на оперативной электрической схеме и схеме РЗА;
- расшифровывать условное графическое обозначение ТТ на схеме РЗА (вертикальные линии — фазы, горизонтальные — количество вторичных обмоток).

Материально-техническое обеспечение

Наименование	Характеристики
Гарнитура виртуальной реальности	Meta Quest 3, автономный режим работы
Программное обеспечение	Приложение «KRUE», версия 1.0
Источник распространения ПО	Раздел «Неизвестные источники» (Unknown Sources)
Рабочая зона	Свободное пространство не менее 2×2 метра, закрытое помещение
Уровень заряда батареи	Не менее 50 %

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

4.1. Элегазовый выключатель 110 кВ

Элегазовый выключатель является основным коммутационным аппаратом ячейки КРУЭ. Он предназначен для надежного включения, проведения и отключения электрических токов как в нормальных рабочих режимах, так и при возникновении аварийных ситуаций, в частности, при коротких замыканиях (КЗ).

Принцип гашения дуги:

Гашение электрической дуги, возникающей при размыкании контактов, происходит в среде гексафторида серы (SF_6). Этот газ обладает высокой электрической прочностью (в 2–3 раза выше, чем у воздуха) и выдающимися дугогасящими свойствами. При расхождении контактов дуга гасится за счет интенсивного турбулентного продольного дутья элегазом, что обеспечивает быструю деионизацию дугового промежутка.

Важным отличием элегазовых выключателей класса 110 кВ в составе КРУЭ (в отличие от аппаратов 220 кВ и выше) является их трехфазное исполнение. Все три полюса (фазы) размещены в едином герметичном металлическом корпусе (баке), заполненном элегазом под избыточным давлением. Это решение позволяет максимально сократить габаритные размеры и массу коммутационного аппарата.



На рисунке наглядно показан элегазовый выключатель 110 кВ в составе КРУЭ с ключевыми конструктивными особенностями:

Единый герметичный металлический корпус (бак) — все три фазы выключателя размещены в одном общем корпусе, что является характерной особенностью выключателей класса 110 кВ (в отличие от выключателей 220 кВ и выше, где каждая фаза имеет отдельный корпус).

Внутренние компоненты в разрезе:

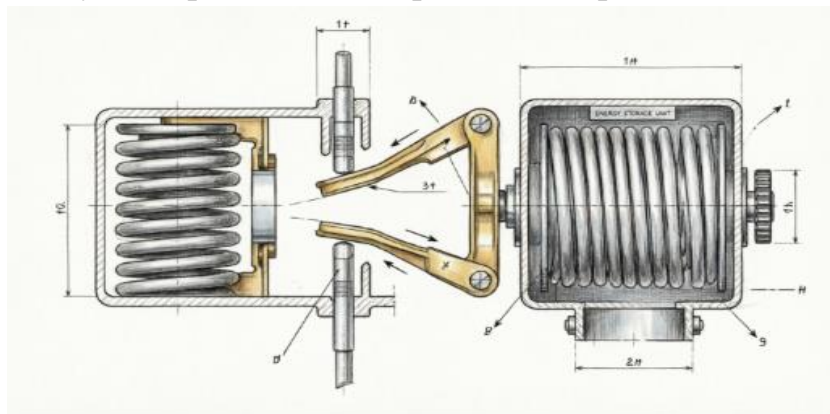
- подвижные и неподвижные контакты;
- дугогасительная камера с соплами для создания турбулентного потока элегаза;

– изоляционные элементы из эпоксидного компаунда.

Пружинный привод — расположен в нижней части выключателя, обеспечивает высокую скорость расхождения контактов и автоматический взвод пружин для цикла «О-В».

4.2. Пружинный привод выключателя

Пружинный привод обеспечивает необходимую высокую скорость расхождения контактов для эффективного гашения дуги, а также накапливает механическую энергию для совершения операций включения и отключения.



Преимущества:

1. Автономность и надежность: привод не зависит от наличия оперативного постоянного тока в цепях управления подстанции, так как энергия накапливается механически в сжатых пружинах.

2. Готовность к циклу О-В: сразу после срабатывания (отключения) привод автоматически осуществляет взвод пружин. Это обеспечивает готовность выключателя к выполнению быстрого цикла «Отключение – Включение» (О-В), который необходим для корректной работы систем автоматического повторного включения (АПВ) линий электропередачи.

4.3. Трансформатор тока (ТТ)

Трансформатор тока устанавливается последовательно с выключателем. Его главная задача — снизить первичный ток (сотни и тысячи ампер) до стандартных безопасных значений (1 А или 5 А), необходимых для питания цепей релейной защиты и автоматики (РЗА), а также измерительных приборов.

На схеме наглядно показан трансформатор тока, используемый в КРУЭ 110 кВ, в разрезе с ключевыми конструктивными элементами:

Тороидальный (кольцевой) сердечник из листовой электротехнической стали — основа трансформатора тока;

Первичный проводник (центральный стержень) — проходит через центр сердечника, по нему протекает измеряемый первичный ток;

Вторичные обмотки (медные катушки золотистого цвета) — намотаны на сердечник, с них снимается пониженный ток (1 А или 5 А);

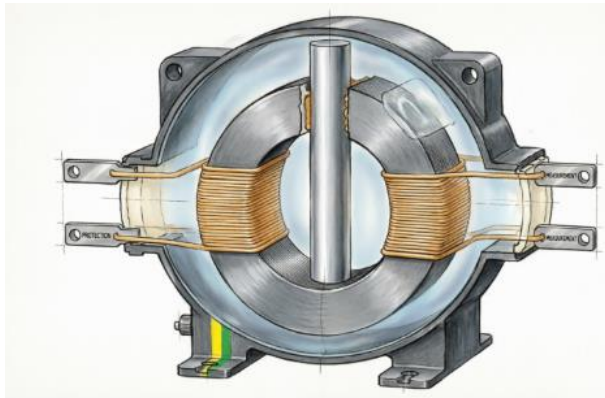
Выводы для подключения:

- PROTECTION — для цепей релейной защиты
- MEASUREMENT — для цепей измерения и учета (несколько выводов для разных вторичных обмоток)

Герметичный корпус — металлическая оболочка, заполненная элегазом (SF_6);

Изоляционные элементы — обеспечивают электрическую изоляцию между обмотками и корпусом;

Заземляющий проводник (зелено-желтый провод внизу) — для заземления корпуса.



Особенность изображения на схемах: на однолинейных электрических схемах ТТ является исключением — он изображается в трехфазном исполнении. Это связано с тем, что количество фаз установки ТТ может варьироваться (одна, две или три фазы) в зависимости от типа применяемой защиты и схемы соединения.

Расшифровка условного обозначения:

- вертикальные линии обозначают три фазы первичной обмотки;
- горизонтальные линии обозначают количество вторичных обмоток (в данном случае их несколько для разных цепей: защиты, измерений, учета).

Категорически запрещается разрыв вторичной цепи трансформатора тока под нагрузкой, так как это приводит к появлению высокого напряжения на выводах обмотки, что может вызвать пробой изоляции или поражение персонала электрическим током.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Шаг 17. Локализация элегазового выключателя

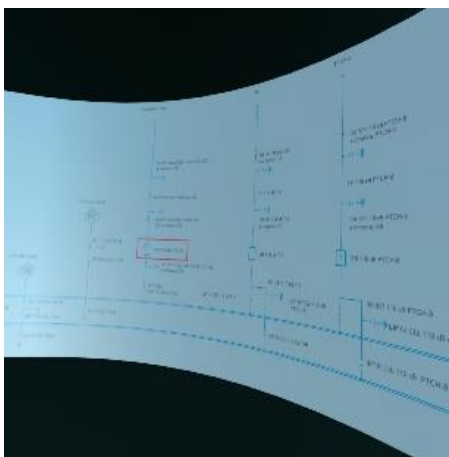
1. Нажмите кнопку «В» на правом манипуляторе для перехода к шагу 17.
2. Виртуальная камера переместится к отсеку выключателя, который будет подсвечен красным цветом.
3. Внимательно осмотрите оборудование. Рядом с выключателем найдите блок, на котором изображены **6 кружочков**.
4. Запомните, что этот блок — **трансформатор тока**.



5. Прочитайте текстовую подсказку: «**Элегазовый выключатель 110 кВ**».

Выключатель является основным коммутационным аппаратом, способным отключать токи короткого замыкания. Трансформатор тока расположен в непосредственной близости от выключателя, так как он измеряет ток, протекающий через этот выключатель, для целей защиты и учета.

Шаг 18. Анализ оперативной схемы выключателя



1. Нажмите кнопку «В» для перехода к шагу 18.
2. В поле зрения появится оперативная схема КРУЭ 110 кВ с выделенным рассматриваемым выключателем.
3. Проанализируйте состояние аппарата на схеме:
 - посередине условного обозначения выключателя нарисована **вертикальная линия** — это означает, что выключатель находится во включенном состоянии;
 - рядом стоящие разъединители замкнуты;
 - убедитесь, что данная цепь подключена к 1-й системе сборных шин (это та же цепь, где ранее рассматривалось кабельное подключение).

4. Сопоставьте положение выключателя на схеме с его физическим расположением в VR-модели.

Оперативная схема отражает фактическое положение коммутационных аппаратов. Вертикальная черта внутри обозначения выключателя всегда

означает замкнутое состояние главных контактов. Разъединители замкнуты, так как выключатель включен и находится под нагрузкой.

Шаг 19. Изучение выключателя в разрезе (включенное состояние)

1. Нажмите кнопку «В» для перехода к шагу 19.
2. Выключатель будет продемонстрирован в разрезе во включенном состоянии.

3. Обратите внимание на ключевую конструктивную особенность: **все три фазы выключателя находятся в одном общем корпусе.**

Для сравнения: на напряжении 220 кВ и выше каждая фаза обычно размещается в отдельном корпусе.

ВНИМАНИЕ: на следующем шаге будет воспроизведен громкий звук срабатывания механизма.



Трехфазное исполнение в одном баке характерно для КРУЭ 110 кВ. Это позволяет существенно сократить габариты оборудования и расход элегаза.

Герметичный корпус заполнен элегазом под избыточным давлением, что обеспечивает высокую надежность изоляции между фазами и на землю.

Шаг 20. Анимация срабатывания выключателя

1. Нажмите кнопку «В» для перехода к шагу 20.
2. Внимательно наблюдайте за анимированным переходом выключателя из включенного состояния в отключенное.

3. Зафиксируйте последовательность физических процессов:

- подвижные и неподвижные контакты **расходятся**;
- между ними возникает **электрическая дуга**;
- за счет турбулентного движения (дутья) элегаза дуга интенсивно **охлаждается и гасится.**

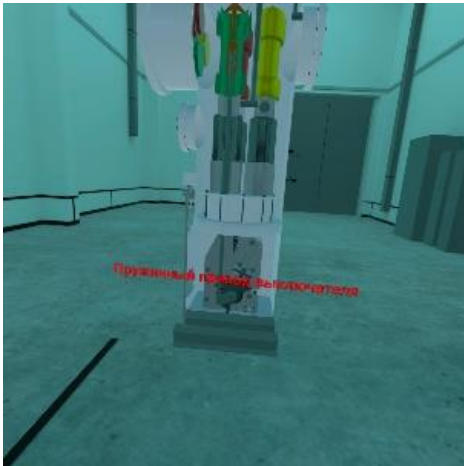


Обратите внимание на сопровождающий звуковой эффект: слышен характерный звук срабатывания механизма и последующего взвода пружин привода.

Процесс гашения дуги в элегазе происходит очень быстро. При расхождении

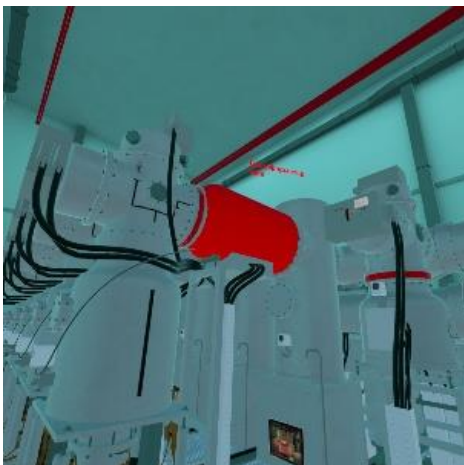
контактов возникает дуга, которая поддерживается ионизированным газом. Поток холодного элегаза, направляемый специальным соплом, интенсивно охлаждает дуговой столб, вызывая деионизацию промежутка и гашение дуги при переходе тока через ноль. Пружинный привод при этом автоматически взводится, подготавливая выключатель к следующему циклу включения.

Шаг 21. Изучение пружинного привода



1. Нажмите кнопку «В» для перехода к шагу 21.
2. Виртуальная камера сфокусируется на нижнем отсеке выключателя в разрезе.
3. Найдите и осмотрите пружинный привод выключателя.
4. Прочитайте текстовую подсказку: **«Пружинный привод выключателя»**.
5. Уясните его назначение: обеспечение нормированной скорости коммутации и накопление механической энергии для последующих операций.

Шаг 22. Изучение трансформатора тока (ТТ)



1. Нажмите кнопку «В» для перехода к шагу 22.
2. Подсветка переместится на корпус, содержащий трансформатор тока (тот самый блок с 6 кружочками).
3. Прочитайте текстовую подсказку: **«Трансформатор тока»**.
4. Вспомните теоретический материал: ТТ подключается в сеть последовательно с выключателем.
5. Уясните его главную задачу: уменьшить первичный ток до значений 1 А или 5 А, необходимых для безопасной работы релейной защиты, автоматики и измерительных приборов.

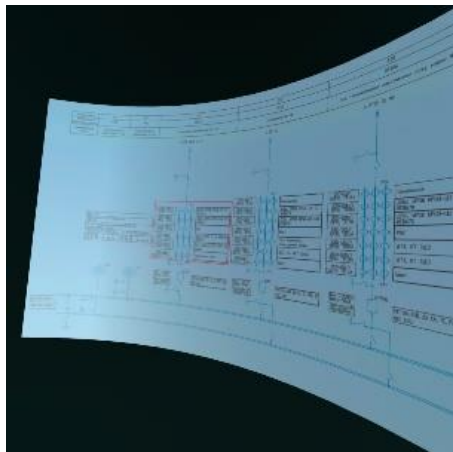
Шаг 23. Анализ схемы релейной защиты и автоматики (РЗА)

1. Нажмите кнопку «В» для перехода к шагу 23.
2. На экране отобразится схема РЗА по КРУЭ 110 кВ с выделенным трансформатором тока.

3. Изучите особенность графического изображения ТТ: в отличие от остальных элементов однолинейной схемы, ТТ изображен в трехфазном исполнении.

4. Расшифруйте обозначение:

- вертикальные линии обозначают три фазы первичной обмотки;
- горизонтальные линии обозначают количество вторичных обмоток (в данном случае их несколько для разных цепей: защиты и измерений).



ТТ является исключением из правила однолинейного изображения схем. Он рисуется трехфазным, потому что количество фаз, в которых устанавливаются ТТ, может быть разным (в одной, двух или трех фазах) в зависимости от типа защиты и схемы соединения.

Горизонтальные отрезки показывают количество вторичных обмоток, каждая из которых питает свою группу потребителей (реле защиты, счетчики, амперметры).

Шаг 24. Изучение вторичных цепей трансформатора тока



1. Нажмите кнопку «В» для перехода к шагу 24.

2. Виртуальная среда подсветит красным цветом отводы питания вторичных схем.

3. Осмотрите выводы вторичных обмоток трансформаторов тока.

4. Прочитайте текстовую подсказку: **«Вывод вторичных обмоток трансформаторов тока для питания вторичных схем».**

5. Уясните, что именно по этим цепям пониженный ток подается на катушки реле защиты, счетчики электроэнергии и устройства автоматики.

Вторичные цепи ТТ — это цепи, по которым протекает измерительный ток (1 А или 5 А) к потребителям. Эти цепи должны быть надежно изолированы и заземлены в одной точке для безопасности. Разрыв вторичной цепи ТТ под нагрузкой категорически запрещен, так как это приводит к появлению высокого напряжения на выводах обмотки и может вызвать пробой изоляции или поражение персонала током.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №4

Отчёт по лабораторной работе должен быть выполнен в тетради для лабораторных работ или в электронном виде (формат А4) и содержать следующие разделы:

1. Титульный блок

Название работы: «Изучение элегазового выключателя 110 кВ и трансформаторов тока с использованием VR-визуализации».

Дата выполнения: _____

ФИО студента, группа: _____

Цель работы: переписать из методических указаний.

2. Элегазовый выключатель 110 кВ (по Шагам 17–21)

Студент должен отразить в отчёте:

- назначение элегазового выключателя в составе КРУЭ;
- конструктивную особенность выключателя 110 кВ (трёхфазное исполнение в одном корпусе);
- эскиз выключателя в разрезе — выполнить от руки схематичное изображение с обозначением: единого герметичного корпуса (бака); подвижных и неподвижных контактов; пружинного привода (в нижней части); трансформаторов тока (рядом с выключателем);
- описание процесса гашения дуги в элегазе (наблюдаемое на шаге 20): последовательность этапов (расхождение контактов → возникновение дуги → охлаждение турбулентным потоком элегаза → гашение); роль гексафторида серы (SF_6) как дугогасящей среды;
- назначение и преимущества пружинного привода (шаг 21): автономность (независимость от оперативного тока); быстроедействие; готовность к циклу «Отключение – Включение» (О-В) для работы АПВ.

3. Трансформатор тока (ТТ) (по Шагам 22–24)

Студент должен заполнить сводную таблицу характеристик трансформатора тока:

№	Параметр (шаг VR)	Значение / Описание
1	Назначение ТТ (Шаг 22)	...
2	Способ подключения	...
3	Стандартные значения вторичного тока	...
4	Особенность изображения на схеме РЗА (Шаг 23)	...
5	Потребители вторичных цепей (Шаг 24)	...

4. Решить и обосновать ситуационные задачи

Задача №1. Почему категорически запрещается разрыв вторичной цепи трансформатора тока под нагрузкой? Обоснуйте последствия для:

- безопасности персонала;
- состояния изоляции трансформатора;
- корректности показаний измерительных приборов.

Задача №2. Почему элегазовые выключатели класса 110 кВ в составе КРУЭ выполняются с тремя фазами в одном общем корпусе, а выключатели 220 кВ и выше — с отдельными корпусами для каждой фазы? Обоснуйте с точки зрения:

- электрической прочности элегаза;
- габаритных размеров и компактности КРУЭ;
- расхода дорогостоящего гексафторида серы (SF_6).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

Изучение трансформаторов напряжения, разъединителей и заземлителей КРУЭ 110 кВ с использованием VR-визуализации

Цель работы:

- изучить назначение, конструкцию и схему подключения трансформаторов напряжения (ТН) в КРУЭ 110 кВ;
- ознакомиться с устройством и назначением разъединителей, правилами их эксплуатации и строгой последовательностью оперативных переключений;
- изучить назначение линейных заземлителей и их роль в обеспечении безопасности ремонтных работ;
- научиться сопоставлять физическое расположение трансформаторов напряжения, разъединителей и заземлителей в виртуальной модели с их отображением на оперативной электрической схеме.

В ходе выполнения лабораторной работы студент должен:

- идентифицировать в VR-среде (шаги 25–31) трансформаторы напряжения, разъединители (шинные и линейные) и линейные заземлители;
- сопоставлять физическое расположение ТН, разъединителей и заземлителей в виртуальной модели КРУЭ с их отображением на оперативной электрической схеме;
- анализировать схему подключения ТН и определять потребителей его вторичных цепей (реле защиты, вольтметры, счетчики);
- определять по оперативной схеме положение разъединителей (замкнуты/разомкнуты) и принадлежность присоединения к системе шин;
- обосновывать строгую последовательность операций при включении и отключении присоединения с учётом требований электробезопасности;
- объяснять последствия ошибочных операций (отключение разъединителя под нагрузкой, включение заземлителя на участок под напряжением).

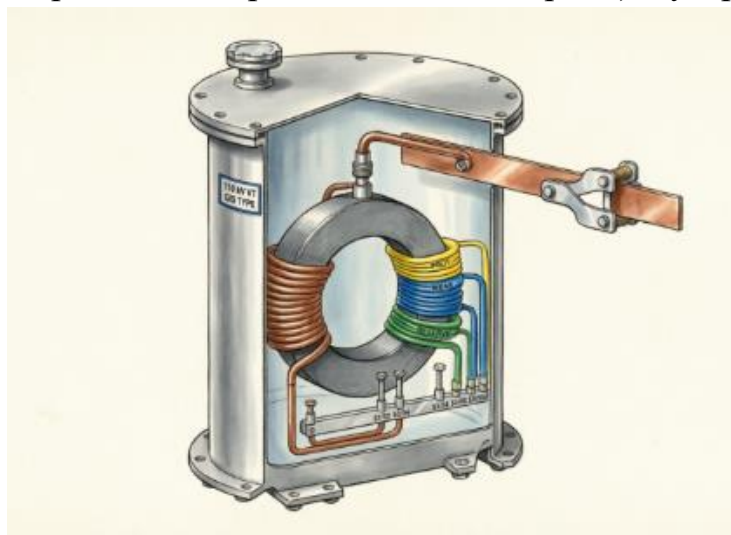
Материально-техническое обеспечение

Наименование	Характеристики
Гарнитура виртуальной реальности	Meta Quest 3, автономный режим работы
Программное обеспечение	Приложение «KRUE», версия 1.0
Источник распространения ПО	Раздел «Неизвестные источники» (Unknown Sources)
Рабочая зона	Свободное пространство не менее 2×2 метра, закрытое помещение
Уровень заряда батареи	Не менее 50 %

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

5.1. Трансформатор напряжения (ТН)

Трансформатор напряжения устанавливается параллельно сборным шинам (через разъединитель) для снижения высокого напряжения (110 кВ) до стандартного безопасного значения 100 В (или $100/\sqrt{3}$ В), необходимого для питания цепей релейной защиты, автоматики, измерительных приборов (вольтметров, ваттметров, счетчиков энергии) и устройств синхронизации.



На рисунке наглядно показан трансформатор напряжения (ТН) 110 кВ для КРУЭ с ключевыми **конструктивными элементами**:

- герметичный металлический корпус — заполнен элегазом (SF_6) для обеспечения изоляции;
- тороидальный магнитопровод (сердечник серого цвета) — основа трансформатора;
- первичная обмотка (медные витки коричневого цвета) — подключается к сборной шине через разъединитель (показан справа);
- вторичные обмотки (разноцветные):
 - PROT (жёлтая) — для цепей релейной защиты
 - MEAS (синяя) — для цепей измерения
 - RESERVE (зелёная) — резервная обмотка
- разъединитель (справа, медная шина с контактами) — обеспечивает возможность вывода ТН в ремонт без отключения системы шин;
- выводы вторичных обмоток (внизу) — клеммы для подключения цепей напряжения (S1/S2, S3/S4, S5/S6 и т.д.);
- табличка "110 kV VT GIS TYPE" — указывает на номинальное напряжение и тип исполнения (для КРУЭ).

Особенности конструкции в КРУЭ: В элегазовых КРУЭ 110 кВ применяются трансформаторы напряжения, размещенные в герметичных корпусах, заполненных элегазом (SF_6). Они имеют одну или несколько вторичных обмоток для разных цепей (измерительных и защитных).

Подключение: ТН подключается к каждой системе сборных шин через отдельный разъединитель, что позволяет выводить ТН в ремонт без отключения всей системы шин.

5.2. Разъединители

Разъединители предназначены для создания видимого электрического разрыва между токоведущими частями (коллекторными шинами или линиями) и отключаемым участком электроустановки после отключения выключателя. Видимый разрыв необходим для обеспечения безопасности персонала, производящего осмотр и ремонт оборудования.



На рисунке наглядно показаны разъединители 110 кВ в составе КРУЭ с ключевыми **конструктивными элементами**:

- герметичный металлический корпус (серого цвета) — заполнен элегазом (SF_6);
- два разъединителя с фиолетовыми подвижными ножами и медными стационарными контактами;
- белые изоляционные опоры — обеспечивают электрическую изоляцию токоведущих частей от корпуса;
- механический привод (внизу) — шестерёнчатый механизм для оперирования разъединителями;
- видимый разрыв цепи — когда ножи разъединителей подняты (открытое положение).

Разъединители **не имеют дугогасительных устройств** и поэтому категорически не предназначены для коммутации токов нагрузки и, тем более, токов короткого замыкания. Отключение или включение разъединителем цепи

под нагрузкой приведёт к возникновению мощной электрической дуги, которая может вызвать междуфазное короткое замыкание, разрушение аппарата и тяжёлые травмы персонала.

Классификация:

– шинные разъединители — обеспечивают подключение присоединения к одной из систем сборных шин (к 1-й или 2-й шине);

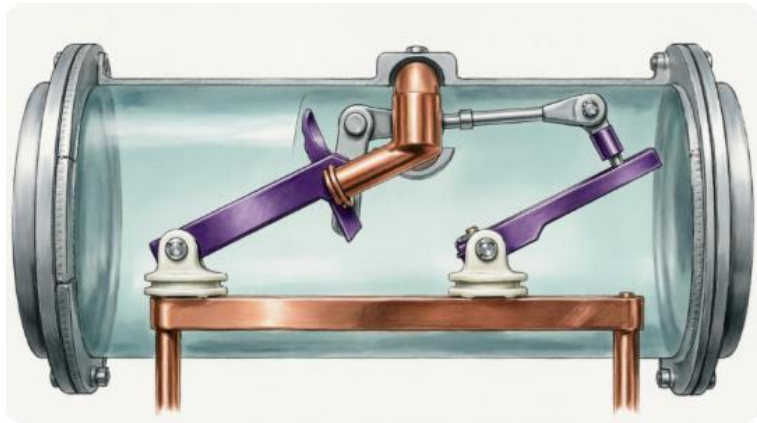
– линейные разъединители — отделяют выключатель от кабельной или воздушной линии.

При отключении присоединения: сначала отключается выключатель (который гасит дугу), затем — линейный разъединитель, и только после него — шинный разъединитель.

При включении присоединения: порядок обратный — сначала замыкаются шинные разъединители, затем — линейные, и в последнюю очередь включается выключатель.

5.3. Линейные заземлители

Линейные заземлители предназначены для надёжного заземления токоведущих частей отключённого электрооборудования (кабельных и воздушных линий) со стороны аппарата перед проведением ремонтных работ. Их главная задача — гарантировать безопасность персонала путём создания искусственного короткого замыкания на землю.



На рисунке наглядно показаны линейные заземлители 110 кВ в составе КРУЭ с ключевыми **конструктивными элементами**:

– герметичный металлический корпус (серого цвета) — заполнен элегазом (SF_6), является заземлённым;

– фиолетовые заземляющие ножи — подвижные контакты заземлителей в открытом и закрытом положениях;

– медная шина заземления (внизу, горизонтальная) — основная магистраль, к которой подключаются заземляющие ножи;

– белые изоляционные опоры — обеспечивают изоляцию токоведущих частей;

– механический привод (вверху) — обеспечивает оперирование заземляющими ножами;

– медные токоведущие проводники — основные шины, которые заземляются при включении заземлителей.

Основные причины необходимости заземления:

– защита от ошибочной подачи напряжения: в реальных условиях эксплуатации возможны ситуации, когда персонал по ошибке или из-за неисправности блокировок подаст напряжение на участок, где ведутся ремонтные работы. В этом случае включённый линейный заземлитель создаёт короткое замыкание, которое мгновенно отключит защиту питающего выключателя;

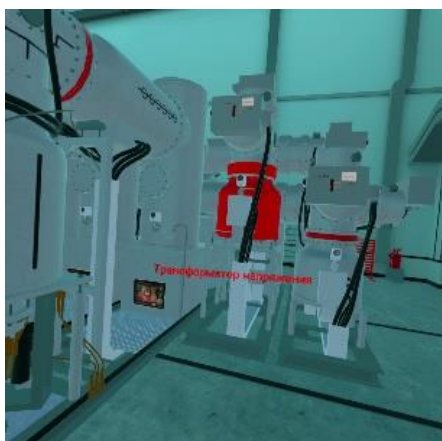
– защита от наведённого напряжения: на отключённых линиях электропередачи, проходящих вблизи действующих ВЛ, может наводиться опасное для жизни напряжение за счёт электромагнитного влияния соседних цепей. Заземление надёжно отводит этот потенциал на землю;

– снятие остаточного заряда: после отключения кабельных линий (особенно большой протяжённости) в их изоляции сохраняется электрический заряд. Заземлитель обеспечивает его безопасный разряд.

В КРУЭ линейные заземлители включены в систему жёстких электрических и механических блокировок, которые не позволяют включить заземлитель при замкнутых разъединителях (то есть на участке под напряжением).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Шаг 25. Локализация трансформатора напряжения



1. Нажмите кнопку «В» на правом манипуляторе для перехода к шагу 25.

2. Виртуальная камера переместится к отсеку трансформатора напряжения, который будет подсвечен красным цветом.

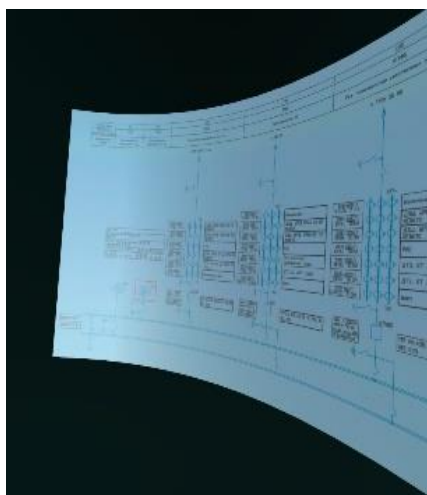
3. Внимательно осмотрите оборудование. Найдите корпус ТН, расположенный рядом со сборными шинами.

4. Прочитайте текстовую подсказку: **«Трансформатор напряжения 110 кВ».**

5. Запомните, что ТН подключается параллельно шинам (в отличие от ТТ, который подключается последовательно).

Трансформатор напряжения устанавливается на каждой системе сборных шин для контроля напряжения и питания цепей защиты. Параллельное подключение обеспечивает измерение напряжения между фазами или фазой и землёй без разрыва основной цепи.

Шаг 26. Анализ схемы подключения ТН



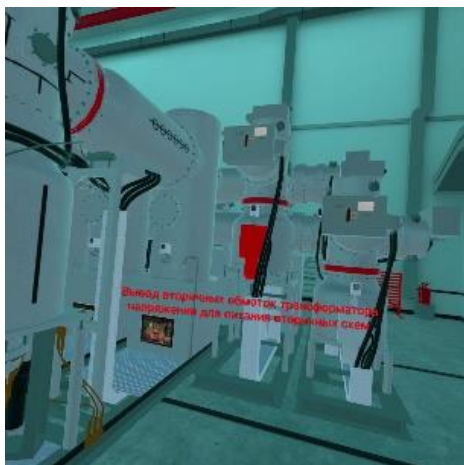
1. Нажмите кнопку «В» для перехода к шагу 26.
2. В поле зрения появится оперативная схема КРУЭ 110 кВ с выделенным трансформатором напряжения.

3. Проанализируйте схему подключения ТН:
– ТН подключён к шинам через разъединитель (это позволяет выводить ТН в ремонт без отключения шин);
– на схеме ТН изображён как катушка с двумя обмотками (первичной и вторичной).

4. Сопоставьте положение ТН на схеме с его физическим расположением в VR-модели.

Подключение ТН через разъединитель обеспечивает возможность безопасной замены или ремонта трансформатора без прекращения работы всей системы шин. На однолинейных схемах ТН обычно изображается в однофазном исполнении (в отличие от ТТ).

Шаг 27. Изучение выводов вторичных обмоток ТН



1. Нажмите кнопку «В» для перехода к шагу 27.
2. Виртуальная среда подсветит красным цветом выводы вторичных обмоток трансформатора напряжения.
3. Осмотрите клеммную коробку или выводы, к которым подключаются вторичные цепи.
4. Прочитайте текстовую подсказку: «Выводы вторичных обмоток трансформатора напряжения».

5. Уясните, что именно по этим цепям сниженное напряжение (100 В) подается на катушки реле защиты, вольтметры, счетчики и устройства синхронизации.

Вторичные обмотки ТН питают цепи напряжения релейной защиты (например, защиты от понижения напряжения), измерительные приборы и устройства автоматики. Стандартное значение вторичного напряжения — 100 В (между фазами) или $100/\sqrt{3}$ В (фаза-земля). В отличие от вторичных цепей ТТ, разрыв цепей напряжения ТН не опасен, но приводит к потере питания защит и приборов.

Шаг 28. Изучение разъединителей



1. Нажмите кнопку «В» для перехода к шагу 28.
2. Подсветка переместится на разъединители (шинные и линейный).
3. Внимательно осмотрите конструкцию разъединителей. Обратите внимание на подвижные ножи и неподвижные контакты.
4. Прочитайте текстовую подсказку: «Разъединители».

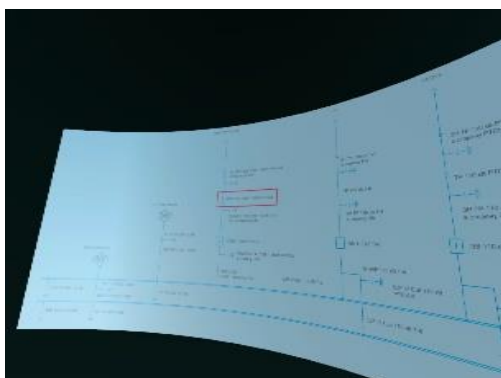
5. Запомните критически важное правило: **разъединители предназначены для создания видимого разрыва в обесточенной цепи и не предназначены для коммутации токов нагрузки.**

Разъединители не имеют дугогасительных камер, поэтому их можно оперировать только при отсутствии тока в цепи. Их главная функция — обеспечить видимый разрыв для безопасности ремонтного персонала.

В КРУЭ разъединители обычно имеют электроприводы для дистанционного управления.

Шаг 29. Анализ оперативной схемы разъединителей

1. Нажмите кнопку «В» для перехода к шагу 29.
2. На экране отобразится оперативная схема КРУЭ 110 кВ с выделенными разъединителями.
3. Изучите положение разъединителей на схеме:
 - определите, какие разъединители замкнуты, а какие разомкнуты;
 - найдите шинные разъединители (подключающие к 1-й и 2-й шинам);
 - найдите линейный разъединитель (отделяющий выключатель от линии).
4. Прочитайте текстовую подсказку о строгой последовательности операций.



Правильная последовательность операций с разъединителями критически важна для безопасности:

При отключении: Выключатель → Линейный разъединитель → Шинный разъединитель;

При включении: Шинный разъединитель → Линейный разъединитель → Выключатель;

Нарушение этой последовательности (например, отключение разъединителя при включенном выключателе) приведёт к возникновению дуги и аварии. Подобные аварийные ситуации могут привести не только к повреждению дорогостоящего коммутационного оборудования, но и к тяжелым травмам или гибели обслуживающего персонала.

Шаг 30. Изучение линейных заземлителей



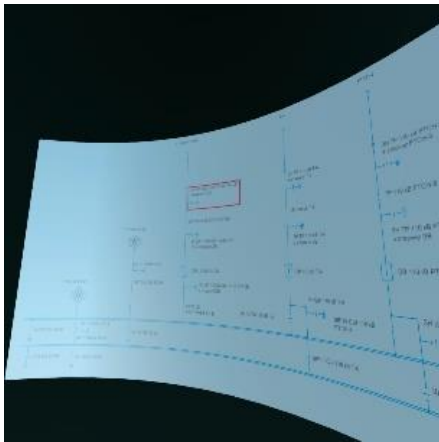
1. Нажмите кнопку «В» для перехода к шагу 30.
2. Подсветка выделит линейные заземлители (заземляющие ножи).
3. Внимательно осмотрите их конструкцию. Обратите внимание на место подключения к шине заземления.
4. Прочитайте текстовую подсказку: «**Линейные заземлители**».

5. Запомните, что заземлители включаются только после полного отключения выключателя и разъединителей и проверки отсутствия напряжения.

Линейные заземлители обеспечивают безопасность ремонтных работ, создавая искусственное короткое замыкание на землю отключённого участка. Это защищает персонал от:

- ошибочной подачи напряжения;
- наведённого напряжения от соседних линий;
- остаточного заряда на кабелях.

Шаг 31. Анализ системы взаимоблокировок заземлителей



1. Нажмите кнопку «В» для перехода к шагу 31.
2. Виртуальная среда продемонстрирует связь заземлителей с системой взаимоблокировок.
3. Обратите внимание на то, что заземлитель не может быть включен, если разъединитель замкнут.
4. Прочитайте текстовую подсказку о блокировках.
5. Уясните, что система блокировок физически предотвращает ошибочные операции.

Система взаимоблокировок (электрическая и механическая) не позволяет:

- включить заземлитель при замкнутых разъединителях (на участке под напряжением);

- включить разъединители при включённом заземлителе (что привело бы к КЗ при подаче напряжения).

Эти блокировки являются ключевым элементом безопасности в КРУЭ.

Дополнительно система исключает возможность открытия дверей и панелей отсеков для доступа к токоведущим частям до полного снятия напряжения с ячейки. Такой жесткий алгоритм переключений надежно защищает обслуживающий персонал от ошибочных действий и поражения электрическим током, соответствуя строгим требованиям ПУЭ. Любые попытки самовольного отключения, шунтирования или обхода цепей взаимоблокировки категорически запрещены и приравниваются к грубому нарушению правил охраны труда.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №5

Отчёт по лабораторной работе должен быть выполнен в тетради для лабораторных работ или в электронном виде (формат А4) и содержать следующие разделы:

1. Титульный блок

Название работы: «Изучение трансформаторов напряжения, разъединителей и заземлителей КРУЭ 110 кВ с использованием VR-визуализации».

Дата выполнения: _____

ФИО студента, группа: _____

Цель работы: переписать из методических указаний.

2. Трансформатор напряжения (ТН) (по Шагам 25–27)

Студент должен отразить в отчёте:

- назначение трансформатора напряжения в составе КРУЭ;
- способ подключения ТН;
- эскиз схемы подключения ТН — выполнить от руки схематичное изображение с обозначением:
 - первичной обмотки;
 - вторичных обмоток (для защиты, измерения, резерва);
 - разъединителя для вывода ТН в ремонт;
 - подключения к шинам;
- стандартное значение вторичного напряжения (100 В);
- потребителей вторичных цепей ТН (реле защиты, вольтметры, счетчики энергии, устройства синхронизации).

3. Разъединители (по Шагам 28–29)

Студент должен заполнить сводную таблицу характеристик разъединителей:

№	Параметр (шаг VR)	Значение / Описание
1	Назначение разъединителей (Шаг 28)	...
2	Классификация разъединителей	...
3	Запрет на коммутацию токов нагрузки	...
4	Последовательность операций при отключении присоединения (Шаг 29)	...
5	Последовательность операций при включении присоединения (Шаг 29)	...

4. Решить и обосновать ситуационные задачи

Задача №1. Оператор по ошибке попытался отключить линейный разъединитель, не отключив предварительно выключатель (цепь была под нагрузкой). Что произойдёт? Обоснуйте последствия с точки зрения:

- возникновения электрической дуги (почему разъединитель не может её погасить);
- возможного междуфазного короткого замыкания;
- разрушения оборудования КРУЭ;
- опасности для персонала.

Задача №2. Почему линейный заземлитель не может быть включен, если разъединитель находится в замкнутом положении (участок находится под напряжением)? Объясните с точки зрения:

- системы взаимоблокировок (электрических и механических);
- предотвращения короткого замыкания на землю;
- безопасности персонала, работающего на отключённом оборудовании.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

Изучение шинопроводов и шиносоединительного выключателя КРУЭ 110 кВ с использованием VR-визуализации

Цель работы:

- изучить конструкцию и назначение двух систем сборных шин в КРУЭ 110 кВ;
- ознакомиться с устройством и принципом работы шиносоединительного выключателя (ШСВ);
- изучить схему перевода присоединений с одной системы шин на другую;
- научиться сопоставлять физическое расположение шинопроводов и ШСВ в виртуальной модели с их отображением на оперативной электрической схеме.

В ходе выполнения лабораторной работы студент должен:

- идентифицировать в VR-среде (шаги 32–36) две системы сборных шин, шиносоединительный выключатель (ШСВ) и его шинные разъединители, сопоставляя их физическое расположение в помещении КРУЭ с отображением на оперативной электрической схеме;
- знать конструкцию и назначение систем сборных шин в КРУЭ 110 кВ, включая устройство герметичных элегазовых шинопроводов, а также преимущества схемы с двумя рабочими системами шин;
- проанализировать устройство, назначение и принцип работы шиносоединительного выключателя (ШСВ), а также строгую последовательность оперативных переключений при переводе присоединений с одной системы шин на другую;
- знать условные графические обозначения систем сборных шин, шиносоединительного выключателя и шинных разъединителей на однолинейных оперативных электрических схемах.

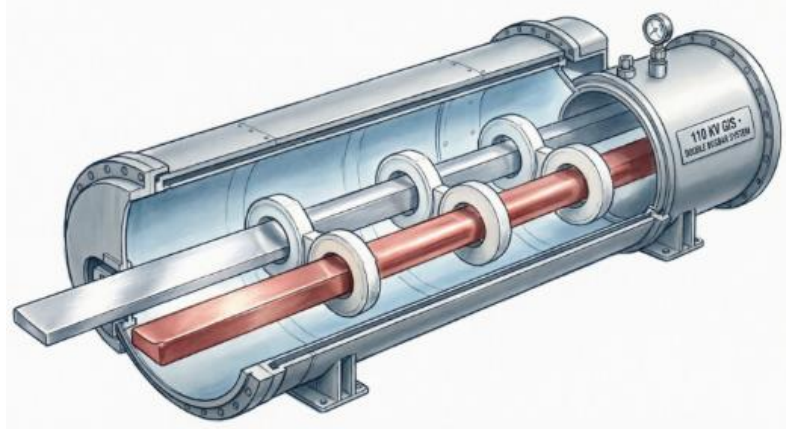
Материально-техническое обеспечение

Наименование	Характеристики
Гарнитура виртуальной реальности	Meta Quest 3, автономный режим работы
Программное обеспечение	Приложение «KRUE», версия 1.0
Источник распространения ПО	Раздел «Неизвестные источники» (Unknown Sources)
Рабочая зона	Свободное пространство не менее 2×2 метра, закрытое помещение
Уровень заряда батареи	Не менее 50 %

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

6.1. Системы сборных шин

Сборные шины предназначены для приёма и распределения электрической энергии между присоединениями. В КРУЭ 110 кВ применяется схема с двумя рабочими системами сборных шин, что обеспечивает высокую надёжность электроснабжения и маневренность оперативных переключений.



На рисунке наглядно показана система двойных сборных шин 110 кВ в составе КРУЭ с ключевыми **конструктивными элементами**:

- два герметичных металлических корпуса (серого цвета) — заполнены элегазом (SF_6) под избыточным давлением, что обеспечивает надёжную изоляцию;
- две системы токоведущих шин:
 - 1-я система шин (медная, красно-коричневого цвета) — нижняя рабочая система сборных шин
 - 2-я система шин (алюминиевая, серебристого цвета) — верхняя рабочая система сборных шин
- белые опорные изоляторы (дисковые) — обеспечивают электрическую изоляцию токоведущих шин от заземлённого корпуса;
- манометр (вверху справа) — для контроля давления элегаза;
- табличка "110 kV GIS - DOUBLE BUSBAR SYSTEM" — указывает на номинальное напряжение и тип исполнения (КРУЭ с двумя системами шин);
- фланцевые соединения — обеспечивают герметичность и возможность монтажа/демонтажа секций.

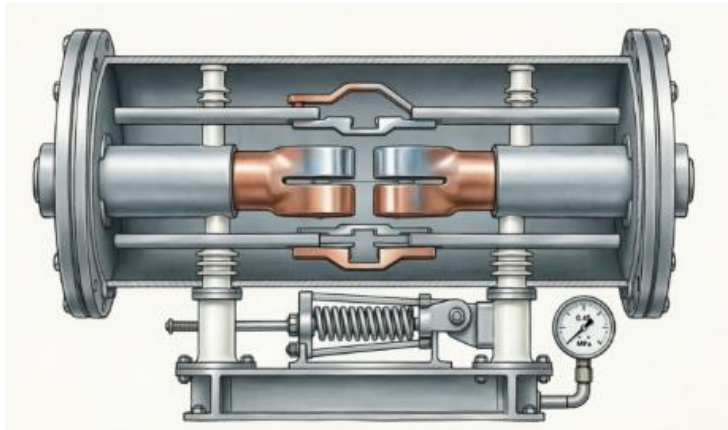
Преимущества схемы с двумя системами шин:

- возможность вывода любой системы шин в ремонт без перерыва питания присоединений;
- возможность перевода присоединений с одной шины на другую для балансировки нагрузки;
- повышение надёжности: при повреждении одной системы шин все присоединения могут быть переведены на другую.

6.2. Шиносоединительный выключатель (ШСВ)

ШСВ устанавливается между двумя системами сборных шин и предназначен для:

- соединения (шунтирования) двух систем шин при переводе присоединений с одной шины на другую;
- обеспечения параллельной работы двух систем шин;
- замены любого выключателя присоединения без отключения этого присоединения (работа в режиме обходного выключателя — в некоторых схемах).



На рисунке наглядно показан шиносоединительный выключатель (ШСВ) 110 кВ в составе КРУЭ с ключевыми **конструктивными** элементами:

- герметичный металлический корпус (серого цвета) — заполнен элегазом (SF_6) под избыточным давлением (манометр показывает 0.45 МПа);
- элегазовый выключатель (в центре, медные контакты) — основной коммутационный аппарат ШСВ;
- два шинных разъединителя:
 - верхний разъединитель — для подключения к 1-й системе шин
 - нижний разъединитель — для подключения ко 2-й системе шин
- пружинный привод (внизу) — обеспечивает быстрое срабатывание выключателя и готовность к циклу «О-В»;

- белые опорные изоляторы — обеспечивают электрическую изоляцию токоведущих частей от корпуса;
- две системы сборных шин (горизонтально сверху и снизу) — к которым подключается ШСВ;
- фланцевые соединения — обеспечивают герметичность и возможность монтажа.

При переводе присоединения с одной системы шин на другую ШСВ должен быть включён (для обеспечения равенства напряжений на шинах), а затем выполняются переключения с шинными разъединителями присоединения.

6.3. Перевод присоединений с одной системы шин на другую

Общая последовательность операций:

- проверить, что обе системы шин находятся под напряжением;
- включить ШСВ (предварительно замкнув его шинные разъединители;
- проверить, что ШСВ включён и обе системы шин запитаны;
- замкнуть шинный разъединитель присоединения на той шине, на которую производится перевод (при этом присоединение оказывается подключённым к обеим шинам одновременно);
- разомкнуть шинный разъединитель присоединения на той шине, с которой производится перевод;
- при необходимости — отключить ШСВ и вывести одну из систем шин в ремонт.

Важность соблюдения последовательности: Нарушение порядка операций может привести к:

- отключению присоединения с разрывом питания потребителей;
- работе разъединителей под нагрузкой (если ШСВ не включён);
- короткому замыканию при ошибочном включении разъединителей.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Шаг 32. Изучение шинопроводов (систем сборных шин)



1. Нажмите кнопку «В» на правом манипуляторе для перехода к шагу 32.
2. Виртуальная камера переместится к шинопроводам, которые будут подсвечены красным цветом.
3. Внимательно осмотрите **две системы сборных шин**, проходящие горизонтально вдоль помещения КРУЭ.

4. Обратите внимание на:

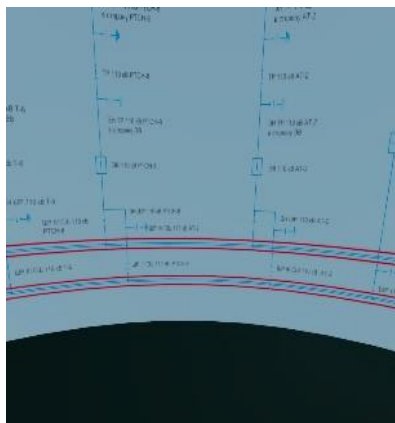
- герметичные металлические короба (трубы) шинопроводов;
- места подключения ячеек к шинам;
- опорные изоляторы внутри шинопроводов.

5. Прочитайте текстовую подсказку: «**Две системы сборных шин 110 кВ**».

6. Запомните, что 1-я шина обычно располагается снизу, 2-я — сверху.

Две системы сборных шин обеспечивают высокую надёжность и маневренность схемы. Герметичное исполнение шинопроводов с элегазовой изоляцией позволяет существенно сократить габариты КРУЭ по сравнению с открытыми распределительными устройствами (ОРУ), где шины располагаются на порталах на значительном расстоянии друг от друга.

Шаг 33. Анализ схемы подключения шинопроводов



1. Нажмите кнопку «В» для перехода к шагу 33.
2. В поле зрения появится оперативная схема КРУЭ 110 кВ с выделенными системами шин.

3. Проанализируйте схему:

– найдите две горизонтальные линии — это 1-я и 2-я системы сборных шин;

– определите, какие присоединения подключены к 1-й шине, а какие ко 2-й;

– найдите шиносоединительный выключатель (ШСВ), соединяющий обе шины.

4. Сопоставьте положение шин на схеме с их физическим расположением в VR-модели.

На оперативной схеме системы шин изображаются горизонтальными линиями в верхней части. Присоединения показываются вертикальными линиями, отходящими от шин. Наличие двух рабочих систем шин позволяет гибко управлять режимами работы подстанции и обеспечивать бесперебойное электроснабжение потребителей.

Шаг 34. Изучение шиносоединительного выключателя (ШСВ)

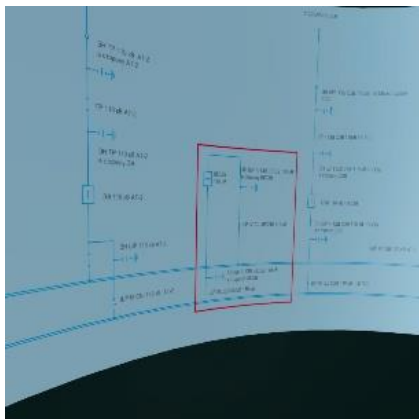


1. Нажмите кнопку «В» для перехода к шагу 34.
2. Подсветка переместится на **шиносоединительный выключатель (ШСВ)**, расположенный между двумя системами шин.
3. Внимательно осмотрите конструкцию ШСВ. Обратите внимание на:
 - герметичный корпус выключателя;
 - два шинных разъединителя (один подключён к 1-й шине, другой ко 2-й);
 - пружинный привод.
4. Прочитайте текстовую подсказку: **«Шиносоединительный выключатель (ШСВ)»**.

5. Запомните, что ШСВ обеспечивает соединение двух систем шин при переводе присоединений.

ШСВ играет ключевую роль в обеспечении маневренности схемы. При переводе присоединения с одной шины на другую ШСВ должен быть включён, чтобы обеспечить равенство напряжений на обеих шинах. Это позволяет оперировать шинными разъединителями присоединения без разрыва тока (так как ток будет распределяться между двумя параллельными цепями).

Шаг 35. Анализ схемы перевода присоединений



1. Нажмите кнопку «В» для перехода к шагу 35.
2. На экране отобразится оперативная схема с выделенной последовательностью операций по переводу присоединения с одной системы шин на другую.

3. Изучите последовательность:

- включение ШСВ;
- замыкание шинного разъединителя на целевой шине;
- размыкание шинного разъединителя на исходной шине.

4. Прочитайте текстовую подсказку о строгой последовательности операций.

5. Уясните, почему нельзя переводить присоединение без включения ШСВ.

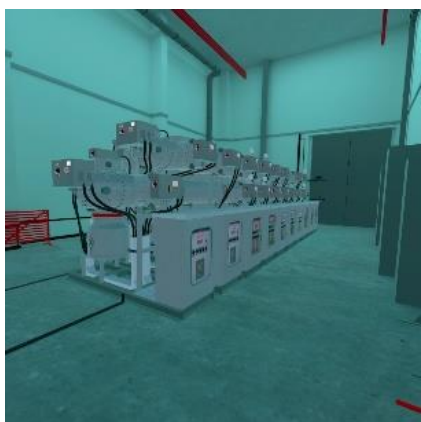
Перевод присоединения с одной системы шин на другую — одна из наиболее ответственных операций в практике эксплуатации КРУЭ. Включение ШСВ перед переключениями обеспечивает:

- параллельную работу двух систем шин;
- отсутствие разрыва тока при оперировании шинными разъединителями;
- безопасность персонала и оборудования.

Нарушение последовательности может привести к отключению присоединения с перерывом питания потребителей или, в худшем случае, к работе разъединителей под нагрузкой.

Шаг 36. Завершение демонстрации. Общий вид КРУЭ

1. Нажмите кнопку «В» для перехода к шагу 36.
2. Виртуальная камера отдалится и покажет общий вид всего КРУЭ 110 кВ со всеми изученными элементами.
3. Внимательно осмотрите помещение КРУЭ: ряд ячеек с фронтальной стороны (шкафы управления); две системы сборных шин, проходящие горизонтально; шиносоединительный выключатель между шинами; кабельные подключения с тыльной стороны; систему заземления.
4. Прочитайте итоговую текстовую подсказку: «Комплектное распределительное устройство 110 кВ».



5. Задайте преподавателю оставшиеся вопросы по устройству КРУЭ.
6. Для завершения работы вызовите системное меню нажатием кнопки на манипуляторе и выберите пункт «Выход» (Quit).

Общий вид КРУЭ позволяет сформировать целостное представление о компоновке распределительного устройства.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №6

Отчёт по лабораторной работе должен быть выполнен в тетради для лабораторных работ или в электронном виде (формат А4) и содержать следующие разделы:

1. Титульный блок

Название работы: «Изучение шинопроводов и шиносоединительного выключателя КРУЭ 110 кВ с использованием VR-визуализации».

Дата выполнения: _____

ФИО студента, группа: _____

Цель работы: переписать из методических указаний.

2. Системы сборных шин (по Шагам 32–33)

Студент должен зафиксировать в отчёте:

- назначение систем сборных шин в КРУЭ 110 кВ;
- конструкцию шинопроводов (герметичные металлические корпуса, заполненные элегазом);
- преимущества схемы с двумя рабочими системами шин (не менее трёх пунктов);
- эскиз фрагмента оперативной схемы: выполнить от руки условное графическое изображение двух систем сборных шин с подключёнными присоединениями (не менее двух присоединений на разных шинах) с использованием стандартных обозначений по ГОСТ.

3. Шиносоединительный выключатель (ШСВ) (по Шагу 34)

Студент должен отразить в отчёте:

- назначение ШСВ (не менее трёх функций);
- конструкцию ШСВ (элегазовый выключатель, два шинных разъединителя, пружинный привод);
- эскиз ШСВ в разрезе: выполнить от руки схематичное изображение с обозначением выключателя, разъединителей и подключения к двум системам шин.

4. Решить и обосновать ситуационные задачи

Задача №1. Оператор попытался перевести присоединение с 1-й системы шин на 2-ю, не включив предварительно шиносоединительный выключатель (ШСВ). Что произойдёт при попытке замкнуть шинный разъединитель на 2-й шине? Обоснуйте последствия с точки зрения:

- возникновения электрической дуги между контактами разъединителя;
- возможного междуфазного короткого замыкания;
- нарушения питания потребителей;

– опасности для персонала.

Задача №2. Почему в КРУЭ 110 кВ применяется схема с двумя рабочими системами сборных шин, а не с одной? Обоснуйте преимущества с точки зрения:

– надёжности электроснабжения (возможность вывода одной шины в ремонт без перерыва питания);

– маневренности оперативных переключений;

– возможности балансировки нагрузки между шинами.

5. Последовательность перевода присоединений (по Шагу 35)

Студент должен заполнить таблицу последовательности операций при переводе присоединения с одной системы шин на другую:

№	Операция	Описание	Почему это необходимо?
1	Проверка напряжения	Убедиться, что обе системы шин под напряжением
2	Включение ШСВ	Замкнуть шинные разъединители ШСВ, включить ШСВ
3		
4		
5		
6		

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Нормативно-техническая документация

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Издание 7-е. — М.: Главгосэнергонадзор России, 1998–2003 (с действующими изменениями). — Разделы 1–4, посвящённые распределительным устройствам, заземлению, кабельным линиям и коммутационным аппаратам.

2. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок (ПОТЭЭ). Приказ Минтруда России от 15.12.2020 № 903н. — М.: Альфа-Форм, 2021. — 256 с.

3. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭЭП). Приказ Минэнерго России от 13.01.2003 № 6 (с изменениями). — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2020. — 240 с.

4. ГОСТ 2.702-2021. Единая система конструкторской документации. Правила выполнения электрических схем. — М.: Российский институт стандартизации, 2021. — 42 с.

5. ГОСТ IEC 62271-203-2022. Аппараты распределительные и управления высоковольтные. Часть 203. Газоизолированные комплектные распределительные устройства на номинальное напряжение свыше 52 кВ. — М.: Российский институт стандартизации, 2022. — 96 с.

6. ГОСТ Р 58827-2020. Кабели электрические с изоляцией из сшитого полиэтилена на номинальное напряжение 110 кВ. Общие технические условия. — М.: Российский институт стандартизации, 2020. — 38 с.

7. СО 153-34.20.501-2003. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. — 80 с.

Учебники и учебные пособия по электрооборудованию

8. Князевский, Б. А. Электрические распределительные системы: учебник для вузов / Б. А. Князевский. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МЭИ, 2018. — 328 с.

9. Рождественский, А. В. Электрические подстанции и системы: учебник для вузов / А. В. Рождественский, В. В. Смирнов. — 2-е изд., перераб. — СПб.: Питер, 2019. — 704 с.

10. Алиев, И. И. Справочник по электрооборудованию и электроснабжению / И. И. Алиев. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: ИНФРА-М, 2021. — 416 с.

11. Жуков, А. В. Обслуживание и ремонт электрооборудования электростанций и подстанций: учебник для студ. учреждений сред. проф.

образования / А. В. Жуков. — 14-е изд., стер. — М.: Издательский дом «Академия», 2022. — 256 с.

12. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / под ред. С. С. Рокотяна и И. М. Шапиро. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МЭИ, 2019. — 428 с.

Специализированная литература по КРУЭ и элегазовому оборудованию

13. Дроздов, А. Д. Элегазовые распределительные устройства высокого напряжения / А. Д. Дроздов, В. А. Строев. — М.: Энергоатомиздат, 2017. — 208 с.

14. Кувшинцев, А. М. Элегазовые аппараты высокого напряжения / А. М. Кувшинцев. — М.: Энергия, 2018. — 176 с.

15. Рабинович, О. М. Высоковольтные элегазовые аппараты / О. М. Рабинович. — М.: Изд-во МЭИ, 2019. — 224 с.

16. Фёдоров, А. А. Высоковольтные аппараты: учебник для вузов / А. А. Фёдоров, Г. В. Таев. — 2-е изд., перераб. — М.: Энергоатомиздат, 2020. — 384 с.

17. Таев, Г. В. Основы теории электрических аппаратов / Г. В. Таев. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 2018. — 352 с.

Литература по измерительным трансформаторам

18. Кузнецов, Ю. Н. Трансформаторы тока и напряжения / Ю. Н. Кузнецов. — М.: Энергоатомиздат, 2019. — 224 с.

19. Ревунов, В. Г. Измерительные трансформаторы в системах учёта и защиты / В. Г. Ревунов. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2020. — 192 с.

20. Справочная книга по расчёту электрических цепей / под ред. Б. Я. Жуховицкого. — М.: Энергия, 2018. — 360 с.

Литература по кабельным линиям и системам заземления

21. Беленький, Е. М. Кабельные линии электропередачи / Е. М. Беленький. — 3-е изд., перераб. — М.: Энергоатомиздат, 2019. — 256 с.

22. Князев, Б. А. Заземление в электроустановках / Б. А. Князев. — М.: Энергоатомиздат, 2018. — 192 с.

23. Васильев, В. А. Кабели из сшитого полиэтилена: монтаж и эксплуатация / В. А. Васильев. — М.: Инфра-Инженерия, 2021. — 288 с.

24. Михайлов, С. С. Заземляющие устройства электроустановок: справочник / С. С. Михайлов. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2020. — 160 с.

Литература по охране труда и электробезопасности

25. Долин, П. А. Основы техники безопасности в электроустановках / П. А. Долин. — 4-е изд., перераб. — М.: Энергоатомиздат, 2019. — 416 с.

26. Минин, В. А. Охрана труда в электроустановках: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / В. А. Минин. — 8-е изд., стер. — М.: Издательский дом «Академия», 2022. — 208 с.

27. Справочник по охране труда на предприятиях электроэнергетики / под ред. А. И. Григорьева. — М.: Энергоатомиздат, 2020. — 384 с.

Литература по VR/AR-технологиям в образовании

28. Крылов, А. В. Виртуальная и дополненная реальность в профессиональном образовании / А. В. Крылов. — М.: Изд-во Российского университета транспорта, 2022. — 184 с.

29. Иванов, С. А. Применение VR-технологий при подготовке специалистов электротехнического профиля / С. А. Иванов, Д. В. Петров // Вестник профессионального образования. — 2023. — № 2. — С. 45–52.

30. Смирнов, Д. В. Виртуальные лаборатории в инженерном образовании: методические аспекты / Д. В. Смирнов // Образование и наука. — 2022. — Т. 24, № 8. — С. 112–128.

31. Петрова, О. Н. Цифровые двойники в электроэнергетике: учебное пособие / О. Н. Петрова. — СПб.: Политехника-принт, 2023. — 216 с.

32. Васильев, А. С. Использование технологий виртуальной реальности при изучении электрооборудования подстанций / А. С. Васильев, И. П. Сидоров // Инновации в образовании. — 2024. — № 1. — С. 78–86.

Электронные ресурсы

33. Официальный интернет-портал правовой информации [Электронный ресурс]. — URL: <http://pravo.gov.ru> (дата обращения: 23.06.2026).

34. КонсультантПлюс: справочная правовая система [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 23.06.2026).

35. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU [Электронный ресурс]. — URL: <https://elibrary.ru> (дата обращения: 23.06.2026).

36. Meta Quest Developer Hub: документация для разработчиков VR-приложений [Электронный ресурс]. — URL: <https://developer.oculus.com> (дата обращения: 23.06.2026).

37. Сайт компании «Россети» — техническая документация по электрооборудованию [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.rosseti.ru> (дата обращения: 23.06.2026).