

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Хакасский технический институт – филиал
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

институт

Электроэнергетика

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

Г. Н. Чистяков

подпись

инициалы, фамилия

«___»

_____ 20__ г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.02. «Электроэнергетика и электротехника»

код и наименование специальности

Проблемы компенсации зарядной мощности протяженных линий

тема

на примере ВЛ 220 кВ ПС «Кызылская» – ПС «Чадан»

Руководитель

подпись, дата

К. Т. Н, доцент

кафедры ЭЭ

ученая степень, должность

Е. В. Платонова

инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

Д. Ю. Лапин

инициалы, фамилия

Нормоконтролер

подпись, дата

И. А. Кычакова

инициалы, фамилия

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Хакасский технический институт – филиал
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

институт

Электроэнергетика

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

Г. Н. Чистяков

подпись

инициалы, фамилия

«___»

_____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме бакалаврской работы

Студенту _____ Лапину Даниилу Юрьевичу _____
(фамилия, имя, отчество студента)

Группа ХЭН 17-01: Направление (специальность) 13.03.02 _____
(номер) (код)

_____ «Электроэнергетика и электротехника» _____
(наименование)

Тема выпускной квалификационной работы: Проблема компенсации зарядной мощности протяженных линий на примере ВЛ 220 кВ ПС «Кызылская» ПС «Чадан».

Утверждена приказом по институту № 243 от 23.02.2021

Руководитель ВКР Е. В. Платонова, к.т.н., доцент кафедры ЭЭ

Исходные данные для ВКР Данные АСКУЭ перетоков мощности в ВЛ, параметры схемы

Перечень разделов ВКР:

Введение

1 Шунтирующие реакторы как элемент интеллектуальных сетей

2 Характеристика объекта

3 Разработка модели для анализа режимов узла энергосистемы

4 Расчет и анализ характерных режимов узла энергосистем

4.1 Режимы работы УШР на ПС «Чадан» 220 кВ и ПС «Кызылская» 220 кВ

4.2 Режимы работы УШР на ПС «Чадан» 220 кВ

4.3 Режимы работы, с подключенными конденсаторными батареями на ПС «Кызылская» 110 кВЗ6

Список используемых источников

Руководитель
ВКР

подпись

Е.В. Платонова

инициалы, фамилия

Задание принял к
исполнению

подпись

Д. Ю. Лапин

инициалы, фамилия студента

« » марта 2021 г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Проблемы компенсации зарядной мощности протяженных линий на примере ВЛ 220 кВ ПС «Кызылская» – ПС «Чадан» содержит 50 страниц текстового документа, 7 рисунков, 8 таблиц, 25 использованных источников, 2 приложения, 3 листа графического материала.

Объект исследований – межсистемная связь Красноярской и Хакасской энергосистем, выполненная ВЛ 220 кВ Кызылская – Чадан.

Цель работы: изучить режимы работы компенсирующих устройств на участке сети воздушной линии 220 кВ Кызылская – Чадан, а также на близлежащих подстанциях 110 кВ, соединяющих подстанцию «Чадан» и подстанцию «Кызылская» линией 110 кВ; а также проанализировать работу компенсирующих устройств.

Задачи выпускной квалификационной работы: смоделировать электрическую сеть линии от подстанции «Кызылская» до подстанции «Чадан» 220 кВ, а также линию 110 кВ вместе с находящимися на них подстанциями в программном комплексе RastrWin3; проанализировать напряжение в данном участке сети в разных режимах работы компенсирующих устройств; подобрать оптимальные режимы работы компенсирующих устройств; спрогнозировать введение новых компенсирующих устройств в данный участок сети.

ABSTRACT

The final qualifying work on the topic "Problems of compensation of charging power of extended lengths on the example of 220 kV overhead lines from the Kyzylskaya SS - Chadan SS" contains 49 pages of a text document, 7 figures, 8 tables, 25 used sources, 2 annexes, 3 sheets of graphic material. The object of research is the intersystem connection of the Krasnoyarskaya and Khakasskaya power systems, performed by the 220 kV overhead line Kyzylskaya – Chadan.

The purpose of the work is to study the operating modes of compensating devices at the section of the 220 kV overhead line Kyzylskaya – Chadan, as well as at the nearby 110 kV substations connecting the Chadan substation and the Kyzylskaya substation with a 110 kV line; and also analyze the work of compensating devices. Purpose of the work: to study the operating modes of compensating devices on the section of the 220 kV overhead line network Kyzylskaya – Chadan, as well as at nearby 110 kV substations connecting the Chadan substation and the Kyzylskaya substation with a 110 kV line; and also analyze the work of compensating devices. Tasks of the final qualifying work: to model the electrical network of the line from the Kyzylskaya substation to the Chadan 220 kV substation, as well as the 110 kV line with the substations located on them in the RastrWin3 software package; analyze the voltage in a given section of the network in different modes of operation of compensating devices; select the optimal operating modes of compensating devices; predict the introduction of new compensating devices in this section of the network.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Шунтирующие реакторы как элемент интеллектуальных сетей	5
2 Характеристика объекта	11
3 Разработка модели для анализа режимов узла энергосистемы	20
4 Расчет и анализ характерных режимов узла энергосистем	25
4.1 Режимы работы УШР на ПС «Чадан» 220 кВ и ПС «Кызылская» 220 кВ	26
4.2 Режимы работы УШР на ПС «Чадан» 220 кВ.....	34
4.3 Режимы работы, с подключенными конденсаторными батареями на ПС «Кызылская» 110 кВ	36
Заключение	41
Список используемых источников.....	41

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных вопросов, решаемых при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения промышленных предприятий, является вопрос о компенсации реактивной мощности [1]. Актуальность темы связана с тем, что в последние годы в электроэнергетике России и других стран характеризуются интенсивным развитием автоматически управляемых линий высокого и сверхвысокого напряжения [2].

Цель работы: изучить режимы работы компенсирующих устройств на участке сети воздушной линии 220 кВ Кызылская – Чадан, а также на близлежащих подстанциях 110 кВ, соединяющих подстанцию «Чадан» и подстанцию «Кызылская» линией 110 кВ; а также проанализировать работу компенсирующих устройств.

Цель достигается решением следующих задач выпускной квалификационной работы:

- смоделировать электрическую сеть линии от подстанции «Кызылская» до подстанции «Чадан» 220 кВ, а также линию 110 кВ вместе с находящимися на них подстанциями в программном комплексе RastWin3;
- проанализировать напряжение в данном участке сети в разных режимах работы компенсирующих устройств;
- подобрать оптимальные режимы работы компенсирующих устройств линии связи между хакасской и красноярской энергосистемами.

Работа выполнена в соответствии с нормативными документами [3, 4, 5].

1 Шунтирующие реакторы как элемент интеллектуальных сетей

В настоящее время в электроэнергетике стран СНГ и зарубежных стран большое значение придается созданию управляемых или гибких линий электропередач, являющихся составной частью «интеллектуальных» (Smart Grid) сетей с устройствами FASCT (Flexible Alternative Current Transmission Systems) [6]. Для оптимального ведения режимов таких энергосистем необходимы высокоэффективные средства регулирования потоков как активной, так и реактивной мощности [7].

Существуют уже десятки пилотных проектов, где применение «умных счетчиков», «умных лифтов», «умных домов», использование солнечной и ветровой энергии в сочетании с «умными домами» дает существенную экономию потребителю при оплате услуг энергетических организаций. Среди технических средств, имеющих отношение к «интеллектуальной энергетике» есть группа устройств регулирования (компенсации) реактивной мощности [8]. Речь идет об управляемых устройствах компенсации реактивной мощности, предназначенных для выполнения задачи обеспечения качества электрической энергии по напряжению путем поддержания заданных уровней напряжения в контрольных пунктах сети. Возможны комбинации, когда параллельно управляемым шунтирующим реакторам (далее – УШР) подключаются конденсаторные батареи (КБ). Предпочтительная область их применения – распределительные сети [9].

Регулирование уровней напряжения и реактивной мощности в электрических сетях представляет собой одну из важнейших задач. Режим напряжения электрических сетей во многом определяет надежность работы как самого энергообъединения, так и энергоснабжения отдельных потребителей. Кроме того, поддержание оптимальных уровней напряжений на шинах подстанций обеспечивает минимизацию потерь активной мощности в электрических сетях и тем самым повышает эффективность функционирования электрических сетей [10]. Именно повышение качества электрической энергии

и нормализация параметров режима работы являются основными составляющими эффекта от внедрения УШР [11-12].

Для управления режимами по напряжению и реактивной мощности наряду с традиционным применением генераторов, синхронных и статических компенсаторов, коммутируемых реакторов и конденсаторных батарей в последнее десятилетие все более широко используются новые устройства – УШР [13].

Потребность в управляемых средствах компенсации реактивной мощности имеется в сетях всех классов напряжения. Однако в сетях 500 кВ и выше число и важность решаемых с помощью УШР задач оказывается наиболее значительными.

Шунтирующие реакторы (ШР), как элемент электроэнергетической системы, обычно появляются на подстанциях или линиях электропередачи классов напряжения 330 кВ и выше. В случаях особо длинных линий они могут применяться и при более низких напряжениях: 110 и 220 кВ.

Основное назначение ШР снизить до допустимого уровня напряжение на открытом участке воздушной линии (ВЛ) или кабельной линии (КЛ) при их одностороннем включении на шины питающей сети (это может быть электрическая станция или же подстанция). Такой реактор устанавливают на линии и называют линейным. Вторая цель установки ШР – ограничить так называемый «сток» избыточной реактивной мощности с ВЛ или КЛ (при малых нагрузках по линии) в примыкающую к линии сеть. Такой реактор устанавливают на шинах подстанции (станции) и называют подстанционным (стационарным). Третье назначение ШР – снизить величину квазистационарных (временных) перенапряжений и энергию коммутационных перенапряжений до уровней, допустимых для работы установленных на линии ограничителей перенапряжений (ОПН), которые не всегда имеют достаточный запас по выдерживаемому напряжению и поглощаемой энергии [14].

Сущность регулирования напряжения изменением потоков реактивной мощности за счет воздействия на потоки реактивной мощности по элементам

электрической сети заключается в том, что при изменении реактивной мощности изменяются потери напряжения в реактивных сопротивлениях. В отличие от активной мощности, реактивную мощность в узлах сети можно изменять путем установки в них устройств поперечной компенсации, т.е. компенсирующих устройств, подключенных параллельно нагрузке [15]. И все-таки основным назначением управляемых шунтирующих реакторов является регулирование напряжения и реактивной мощности.

Трансформаторное исполнение для открытой установки на любой класс напряжения с возможностью плавного регулирования потребляемой реактивной мощности позволяет установить УШР в любой части энергосистемы и обеспечить необходимые стабилизацию напряжения, оптимизацию потоков реактивной мощности, повышение пропускной способности электропередач, снижение потерь, числа коммутаций выключателей и действия РПН трансформаторов [16].

Практическая история создания управляемых реакторов и их использование начинается с далеких 50-х годов прошлого века, когда началось освоение и строительство линий электропередачи высокого и сверхвысокого напряжений. Тогда же были сформулированы и требования к таким аппаратам, основными из которых являются:

- синусоидальность потребляемого тока;
- большой коэффициент регулирования;
- возможность прямого подключения на высокое напряжение;
- высокое (регулируемое по требованию заказчика) быстродействие;
- низкий расход активных материалов и низкий уровень потерь;
- простота конструкции и изготовления, ремонтпригодность.

Сегодня эти требования практически не изменились и наряду с другими, связанными с конкретной конструкцией, они определяют техническую пригодность аппарата.

Применение УШР позволяет повысить предел передаваемой мощности по условию статической устойчивости практически до значения её натуральной мощности, что особенно актуально для протяженных линий. С использованием УШР стало возможным создание транснациональных электропередач переменного тока протяженностью до 2000–2500 км без использования дорогостоящей технологии передачи постоянным током.

Также, создание УШР расширило область традиционного применения шунтирующих реакторов. Например, в сетях 35–220 кВ в России и за рубежом уже нашли широкое применение так называемые устройства компенсации реактивной мощности (УКРМ), представляющие собой параллельное соединение УШР и конденсаторной батареи, при котором обеспечивается плавное регулирование реактивной мощности от режима её потребления до режима её выработки.

Батареи статических конденсаторов могут работать только как источники реактивной мощности. Они выпускаются на различные номинальные напряжения и мощности [17]. Сочетание УШР с параллельно установленной батареей статических конденсаторов (БСК) позволяет обеспечить не только плавнорегулируемую компенсацию (потребление) реактивной мощности, но и её выдачу в соответствии с мощностью БСК при разгрузке УШР до режима холостого хода [18-20].

По принципу действия трехфазные плавнорегулируемые реакторы для компенсации реактивной мощности можно разделить на три класса – управляемые подмагничиванием магнитопровода, трансформаторного типа (УШРТ) и реакторы с переключением отпаяк (аналогично РПН трансформаторов).

Из большого числа предлагаемых ранее схмотехнических решений и конструкций подмагничиваемых реакторов с продольным, поперечным, кольцевым подмагничиванием, с вращающимся магнитным полем и т.д., - практическое применение получили УШР трансформаторного типа с

продольным подмагничиванием стержней, на которых расположены обмотки реактора.

Управляемые шунтирующие реакторы на данный момент получили широкое распространение в электроэнергетических системах России, особенно на промежуточных подстанциях класса 500 кВ. Однако на электрических станциях по-прежнему применяются нерегулируемые и, в основном, практически некоммутируемые реакторы (ШР). Такие реакторы постоянно нагружают генераторы реактивной мощностью вне зависимости от режима работы электропередачи, начиная от режима её малых нагрузок до расчётных и предельных.

Передача мощности по линиям электропередачи высших классов напряжений наталкивается на ряд серьезных технических проблем. Одной из таких проблем является снижение коэффициента полезного действия (КПД) при передаче малых мощностей. В схемах дальних электропередач с шунтирующими реакторами, установленными в промежуточных точках линии, можно существенно повысить КПД электропередачи в режимах нагрузок меньших натуральной мощности. Наличие неуправляемого реактора ведет к существенному снижению потерь на электропередаче в режиме холостого хода. Однако при увеличении передаваемой по ВЛ мощности наличие реактора, наоборот, увеличивает потери. Поэтому становится необходимым установка управляемого реактора вместо неуправляемого.

Помимо снижения предела передаваемой по линии мощности, о котором сказано выше, шунтирующие реакторы, не имея плавного регулирования своей реактивной мощности, снижают предел статической устойчивости электропередачи. Так, например, на первой электропередаче 1150 кВ «Кибастуз-Кокчетав-Кустанай» пропускная способность линии реально составила около 40 % её натуральной мощности из-за использования в качестве устройств компенсации реактивной мощности нерегулируемых шунтирующих реакторов. Все перечисленные недостатки ШР преодолеваются путем их замены на УШР.

Линейные и подстанционные (станционные) реакторы необходимы, прежде всего, в режимах малой передаваемой по линии активной мощности. Реактивная мощность, вырабатываемая емкостью линии, все больше потребляется в её же продольной индуктивности, и, следовательно, снижается необходимость в шунтирующих реакторах, как дополнительных потребителей реактивной мощности, установленных по концам линии или на шинах примыкающих к линии, при котором вся вырабатываемая емкостью линии реактивная мощность потребляется в продольной индуктивности линии, называется режимом передачи натуральной мощности. В таком режиме вовсе нет никакой необходимости в реакторах, поскольку линия сбалансирована по реактивной мощности, т.е. не является ни источником, ни потребителем.

Если в режимах передачи мощности, близких к натуральной, реакторы остаются присоединенными к линии (или к шинам) и продолжают потреблять реактивную мощность (хотя уже нет в этом необходимости), то это приводит к снижению напряжения на линии, снижению её пропускной способности и росту потерь. Особенно заметным негативное влияние шунтирующих реакторов на пропускную способность оказывается для протяженных линий, поскольку суммарная реактивная мощность ШР для таких линий как правило, значительна. Для исключения упомянутого негативного влияния шунтирующие реакторы приходится оснащать собственными выключателями и многократно коммутировать ими реактор в течение суточного графика изменения передаваемой по линиям мощности.

2 Характер объекта истика

Диспетчерское наименование линии электропередач: ВЛ 220 кВ Кызылская – Чадан. Длина воздушного участка 240,63 км. Количество цепей – 1. Марка провода АС-300/39. Удельное активное сопротивление 0,098 Ом/км. Удельное индуктивное сопротивление 0,4223 Ом/км.

Подстанции «Чадан» и «Кызылская» соединяют две линии. Одна из них вышеописанная 220 кВ. Другая линия – 110 кВ. От линии 110 кВ запитаны отпаечные проходные подстанции (далее – ПС). Среди них ПС «Чадан» 110 кВ, отпайка на ПС «Арыг-Узю» 110 кВ, ПС «Шагонар» 110 кВ, отпайка на ПС «Межегей» 110 кВ, ПС «Городская» 110 кВ, отпайка на ПС «Южная» 110 кВ, ПС «Кызылская» 110 кВ.

На рисунке 1 представлена электрическая схема рассматриваемого энергоузла. ПС «Кызылская» находится в ведении Красноярского РДУ ПС «Чадан» принадлежит оперативной зоне диспетчеров Хакасского РДУ.

Рассматриваемая линия является объектом пристального внимания диспетчеров АО «СО ЕЭС», так как на ней часто происходят перенапряжения при небольшой передаваемой мощности, связанные с генерацией реактивной зарядной мощности. Также возникают значительные потери в линии. Работа линии в таких режимах часто приводит к тому, что персоналу приходится выводить линию в резерв. Для уменьшения влияния зарядной мощности на ПС «Кызылская» 220 кВ (секция шин 110 кВ) и ПС «Чадан» установлены компенсирующие устройства – управляемые шунтирующие реакторы. Также на ПС «Кызылская» 220 кВ (секция шин 110 кВ) к линии установлены конденсаторные батареи.

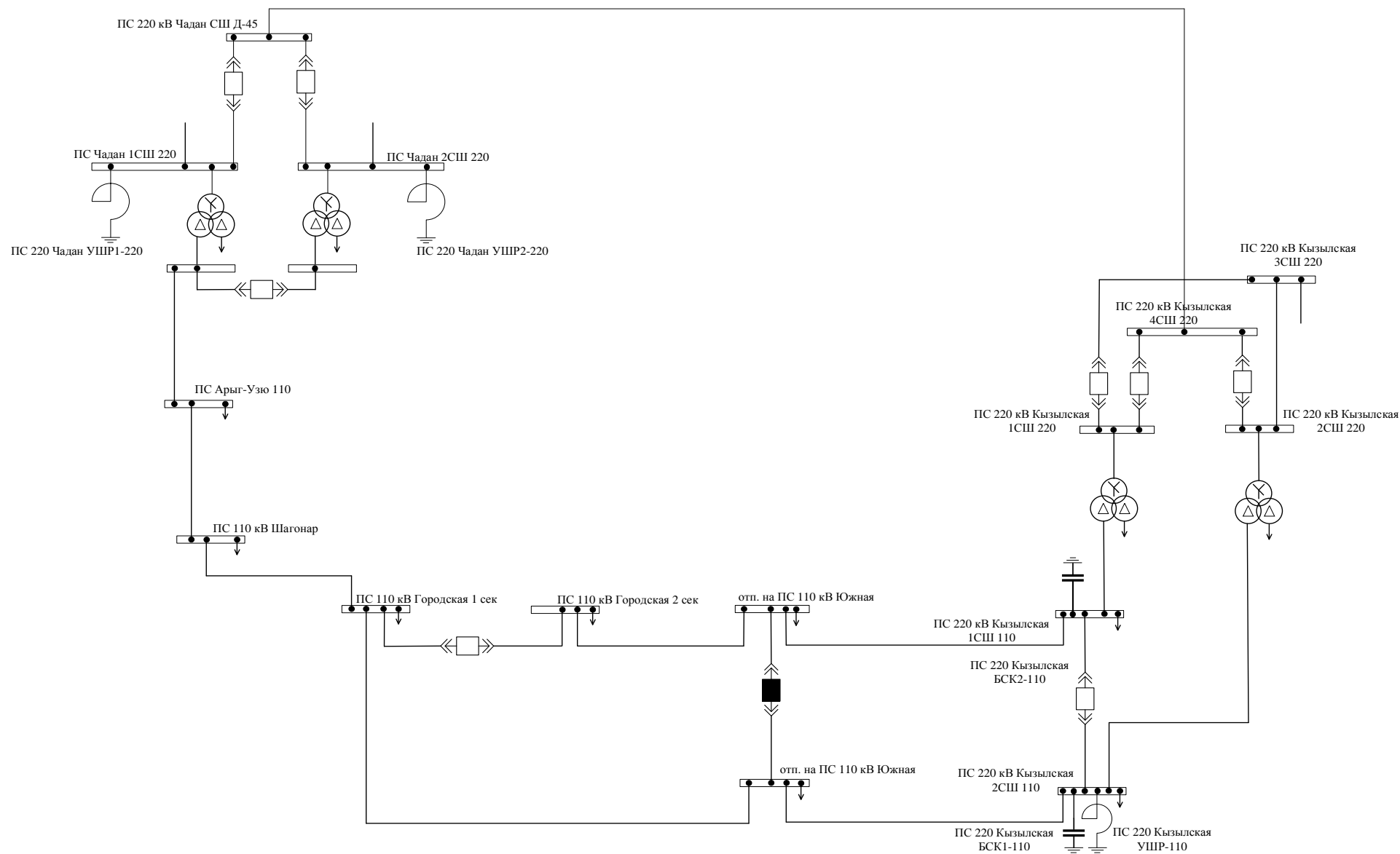


Рисунок 1 – Электрическая схема энергоузла, соединяющего ПС «Чадан» и ПС «Кызылская»

Из компенсирующих устройств, установленных на рассматриваемом узле электрической сети, находятся всего пять устройств. Два управляемых шунтирующих реактора находятся на 1-ой и 2-ой секции шин 220 кВ ПС «Чадан». На 1-ой секции шин подстанции установлен шунтирующий реактор на 50 Мвар, на 2-ой секции шин – на 26,3 Мвар. Три компенсирующих устройства, но уже с менее внушительной номинальной мощностью установлены на шинах 110 кВ ПС «Кызылская». Среди них один управляемый шунтирующий реактор на 14,2 Мвар и две конденсаторные батареи, генерирующие в сеть по 26 Мвар каждая.

Установка управляемых шунтирующих реакторов на ПС «Чадан» в шинах 220 кВ обоснована направлением потоков мощности. Чаще всего направление активной мощности от ПС «Кызылская» к ПС «Чадан». Аналогично и с реактивной мощностью – в сторону ПС Чадан, только её направление остается **постоянны**. На рисунках 2-3 отображено значение и направление передаваемой мощности в одном из режимов сети.

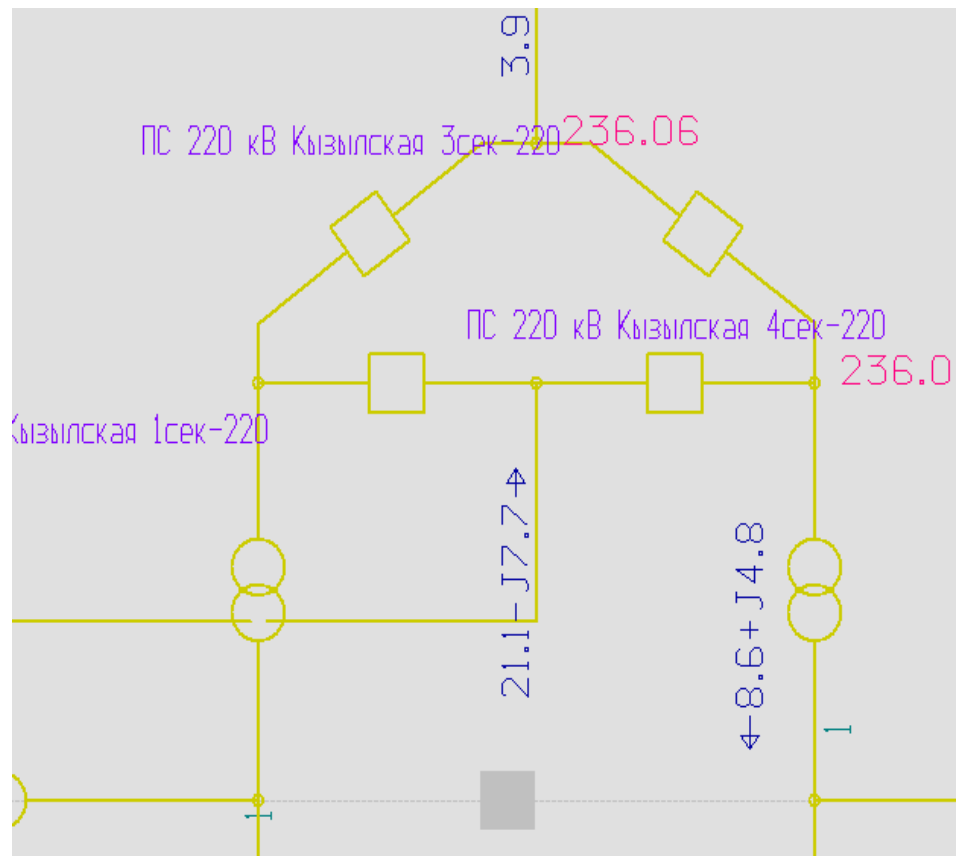


Рисунок 2 – Направление перетоков мощности на ПС «Кызылская» 220 кВ

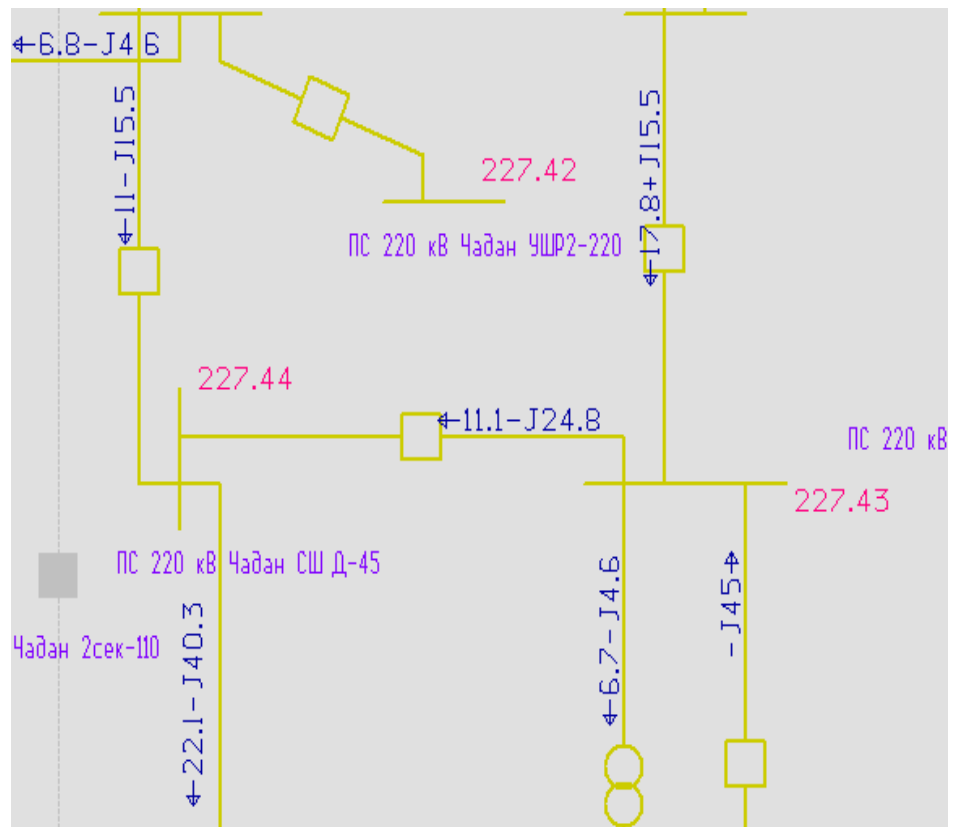


Рисунок 3 – Направление перетоков мощности на ПС «Чадан» 220 кВ

Линия 220 кВ ПС «Чадан» – ПС «Кызылская» примечательна тем, что при большой длине генерирует реактивную мощность, называемую зарядной. Особенность зарядной мощности заключается в том, что её проявление наиболее ощутимо в линиях электропередач, в которых наибольшее значение принимают характеристики линии, связанные с её емкостью и соответствующей длиной. Также на величину зарядной мощности влияет класс напряжения линии. Чем выше класс линии, тем выше её зарядная мощность. Например, относительно небольшая емкость линии в сетях класса напряжения 110 кВ, когда в 500 – 750 кВ значительно выше. Именно такие сети, как ВЛ 220 кВ Кызылская – Чадан, начиная с класса 220 кВ, заканчивая 500 кВ и выше страдают от большой зарядной мощности в линии.

Емкость воздушной линии переменного тока практически не влияет на передаваемую мощность, однако через нее протекает так называемый зарядный ток, который создает зарядную мощность линии и приводит к дополнительному нагреву проводов, т.е. увеличивает потери энергии в линии и снижает ее КПД. Зарядная мощность линии не зависит и от ее нагрузки. Реактивная индуктивная мощность, потребляемая линией, пропорциональна квадрату тока, протекающего по ней. При определенном значении нагрузки потребителей эти мощности станут равными, и так как зарядная мощность протекает навстречу реактивной индуктивной мощности, они взаимно компенсируются [21].

Определение зарядной мощности линии будет отображено в формуле 1.

$$Q_{\text{зар}} = U_{\text{ном}}^2 \cdot l \cdot b_0 \cdot n \quad (1)$$

где l – длина линии электропередач; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение линии, кВ; n – число цепей воздушных линий при одинаковом сечении провода b_0 , См/км – погонная емкостная характеристика линии [22].

Данная формула показывает зависимость зарядной мощности от длины линии, класса напряжения, а также погонной емкостной характеристики линии.

При расчёте удобно подставлять номинальное значение напряжения в киловольтах (кВ), тогда значение зарядной мощности получается в мегаварах (Мвар, где вар – вольт ампер реактивный).

При отсутствии компенсации реактивной мощности значения напряжений в энергосистеме на близлежащих подстанциях становятся выше допустимых пределов, ухудшается качество электрической энергии, возрастают потери в линии электропередач, снижая КПД линии. Таким образом, решая вопросы компенсации реактивной мощности, мы решаем задачи повышения пропускной способности сети, а также надёжности и качества электроснабжения [23].

Согласно оперативным данным, полученным в ходе прохождения стажировки в Хакасском РДУ, нам удалось выяснить, что линия 220 кВ Кызылская – Чадан является объектом, часто отключаемым. Это происходит вследствие перенапряжений, связанных с генерацией большой реактивной мощности по отношению с передаваемыми мощностью. Тем самым она заслуживает рассмотрения.

При пропускной способности линии, составляющей $S = 240,1$ МВА перетоки активной мощности по данным Филиала АО «СО ЕЭС» «Региональное диспетчерское управление энергосистемы Республики Хакасия», предоставленным за 2020 год, перетоки активной мощности варьируются в пределах от 0 до 70 МВт. Как описано выше, наиболее частым является направление перетоков от ПС «Кызылская» к ПС «Чадан». Однако в отдельные периоды (около 6% времени в году) активная мощность передается от ПС «Чадан» к ПС «Кызылская». На рисунке 4 представлены средние значения модулей мощностей, передаваемых в линии по месяцам 2020 года. Данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Средние значение перетоков мощности в 2020 году в ВЛ 220 кВ
Кызылская – Чадан

Месяц	P, МВт	Q, Мвар	S, МВА	cos φ
январь	7,24	20,27	21,52	0,34
февраль	11,21	23,11	25,69	0,44
март	15,25	22,22	26,95	0,57
апрель	18,31	23,58	29,85	0,61
май	19,8	27,19	33,64	0,59
июнь	17,2	31,48	35,87	0,48
июль	15,88	25,82	30,31	0,52
август	13,78	33,83	36,53	0,38
сентябрь	20,41	30,71	36,87	0,55
октябрь	18,21	25,42	31,27	0,58
ноябрь	10,71	23,81	26,11	0,41
декабрь	5,11	23,03	23,59	0,22

Согласно данным представленным в таблице 1, можем увидеть, что значения активной мощности в 1,5 – 3 раза меньше реактивной. Столбец, характеризующий $\cos \phi$ с низкими значениями, подтверждает преобладающий реактивный характер мощности. Более наглядно характеристики представлены в виде диаграммы значений активной и реактивной мощности на рисунке 4.

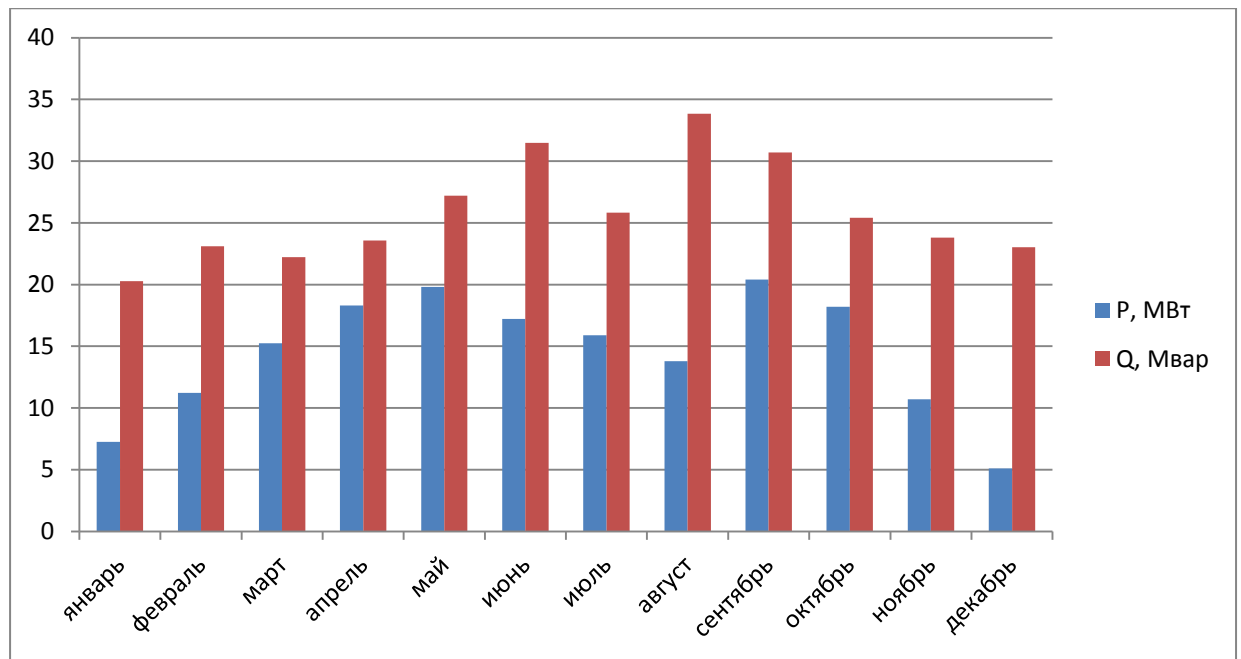


Рисунок 4 – Значения модулей активной и реактивной мощности передаваемые по ВЛ 220 ПС «Кызылская» – ПС «Чадан» в месяц в 2020 году

На рисунке 5 представлена диаграмма перетоков активной и реактивной мощности по линии в течение суток, где картина перетоков мощности менее благоприятная по реактивной мощности, чем средняя по месяцам.

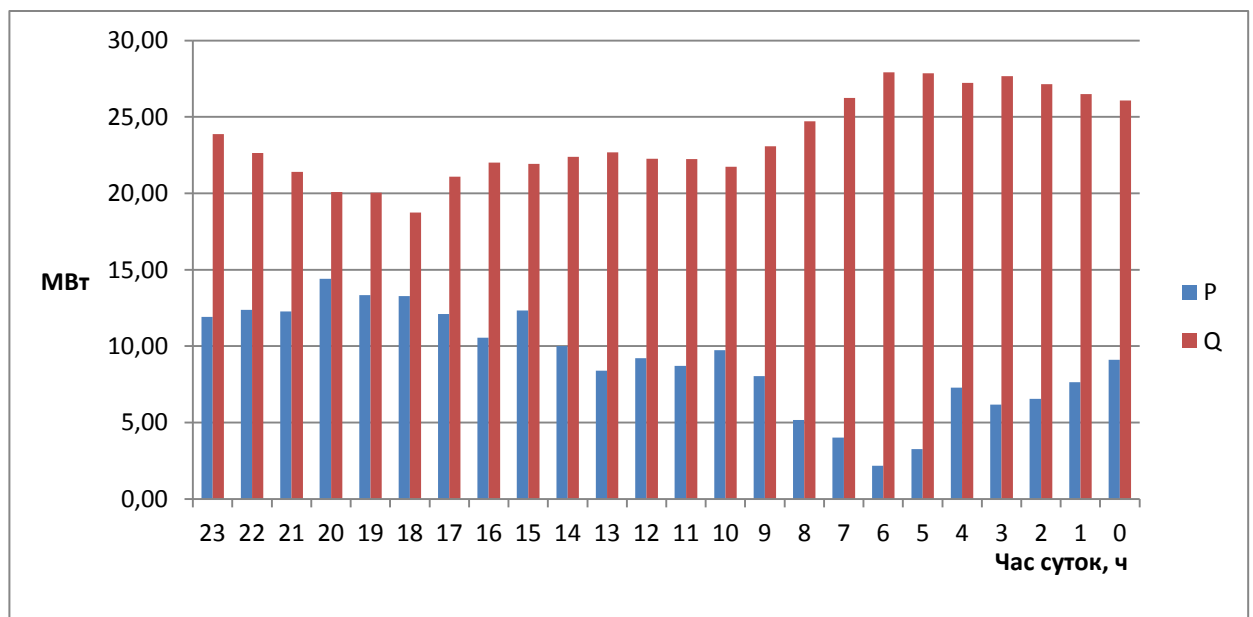


Рисунок 5 – Перетоки мощностей в ВЛ 220 кВ ПС «Кызылская» – ПС «Чадан» 21.11.2020г

Из диаграммы видно, что передаваемая по линии реактивная мощность превышает передаваемую активную мощность в среднем в 2-3 раза, а в отдельные часы и в 5-6 раз. Значения передаваемой реактивной мощности значительно превышают значения активной мощности. Расчетные значения коэффициента мощности варьируются от 0 до 0,6. Причиной этого является большая зарядная мощность, генерируемая линией.

В ходе исследования, также была оценена зарядная мощность линии, которая при номинальном напряжении составляет 31,26 МВАр. Высокая зарядная мощность данной линии вызывает дополнительные потери активной мощности, которые расходуется на нагрев и снижают КПД линии.

Для компенсации зарядной мощности на ПС «Чадан» установлены управляемые шунтирующие реакторы УШР1-220, однако большие перетоки реактивной мощности $Q = 44$ МВАр вызывают дополнительные потери активной мощности 499 кВт и потери соответствующие им потери электроэнергии около 3000 кВт*ч в год.

3 Разработка модели для анализа режимов узла энергосистемы

Расчет режимов электрических сетей будет выполнен в программном комплексе RastrWin3. Данный комплекс предназначен для решения задач по расчету, анализу и оптимизации электрических сетей и систем. Он достаточно распространён на территории России и СНГ. В России основными пользователями являются Системный Оператор Единой Энергетической Системы (СО ЕЭС) и его филиалы, Федеральная Сетевая Компания (ФСК), МРСК, проектные и научно-исследовательские институты (Энергосетьпроект, ВНИИЭ, НИИПТ и т.д.) [24].

В ходе подготовки выпускной квалификационной работы была подготовлена модель электрической сети исследуемого участка энергосистемы. Необходима модель для произведения расчета всех электрических параметров режима (тока, напряжения, потоки и потери активной и реактивной мощности во всех узлах и ветвях электрической сети). В состав модели **входят смоделированных объектов** ПС 500 кВ «Абаканская», ПС 220 кВ «Камышта», ПС 220 кВ «Аскиз», ПС 220 кВ «Абаза», ПС 220 кВ «Ак-Довурак» и другие подстанции 220 кВ, подстанции 110 кВ. Фрагменты участка смоделированной сети представлены на рисунках 6, 7. Полная графика модели электрической сети в RastrWin3 проиллюстрирована на графическом материале работы (лист 2).

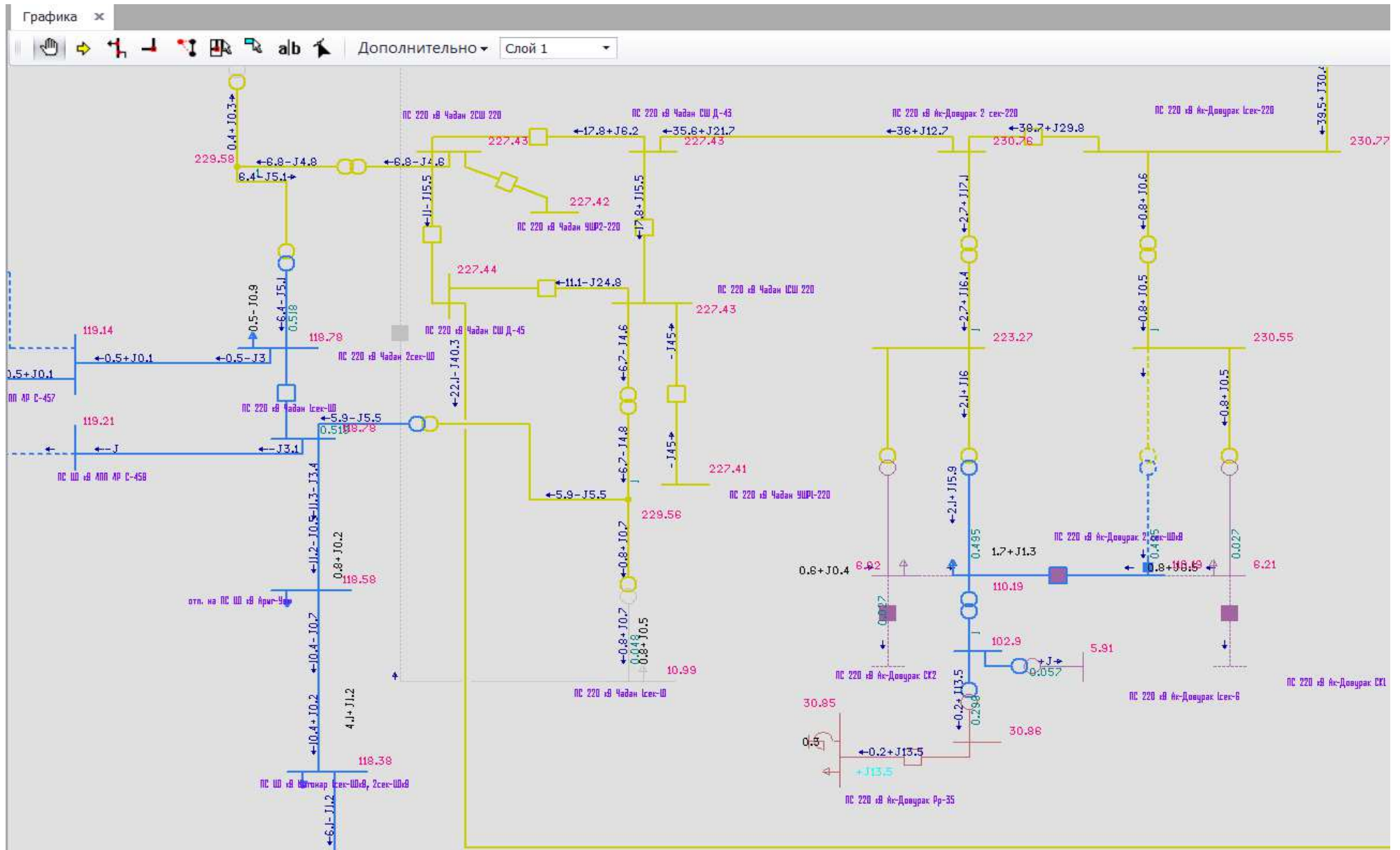


Рисунок 6 – Фрагмент 1 смоделированного участка цепи ВЛ «Кызылская» – ПС «Чадан»

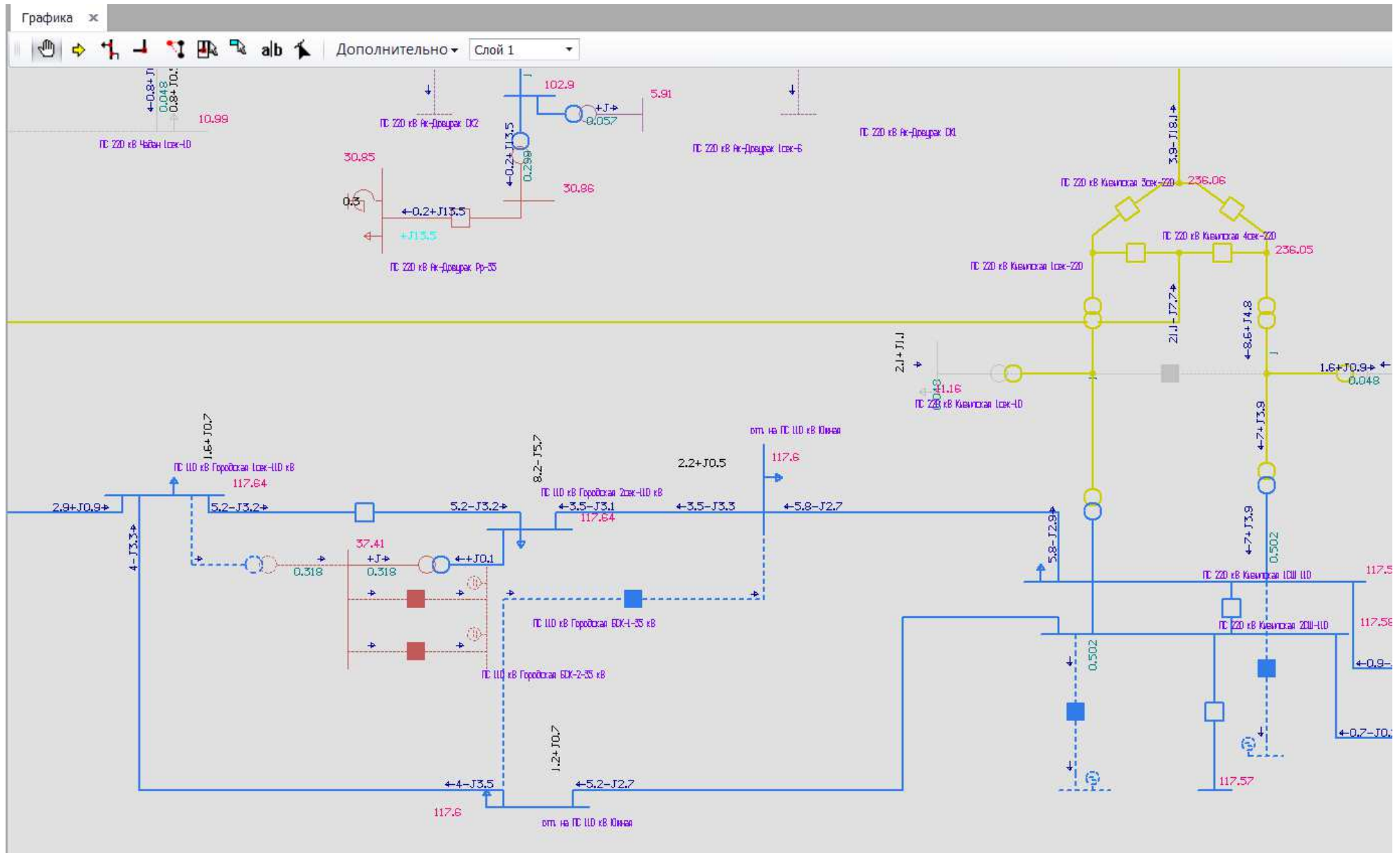


Рисунок 7– Фрагмент 2 смоделированного участка цепи ВЛ 220 кВ ПС «Кызылская» – ПС «Чадан»

Перед составлением модели в программном комплексе были подготовлены исходные данные для расчета:

- составлена схема с указанием всех узлов и ветвей;
- узлы электрической сети были пронумерованы, для каждого из которых были заданы его номинальное напряжение, после чего нанесены на схему;
- для узлов нагрузки заданы активная и реактивная мощность потребления;
- для узлов с синхронными машинами определена активная мощность генерации;
- для компенсирующих устройств – конденсаторных батарей и шунтирующих реакторов – заданы их проводимость, после чего также нанесены на схему;
- для линий электропередач заданы продольное сопротивление и проводимость на землю;
- для трансформаторов определены сопротивление $R + jX$, приведенное к стороне высокого напряжения, проводимость шунта на землю $G + jB$, коэффициент трансформации, равный отношению низшего номинального напряжения к высшему;
- трёхобмоточные трансформаторы и автотрансформаторы представлены по схеме звезда с промежуточным узлом и тремя ветвями, две из которых имеют коэффициенты трансформации.

Объем данных, оформленных в таблицах узлов и ветвей в программном комплексе RastrWin3, вынесен в приложение 1 и 2 соответственно.

В полученной схеме базой является ПС 500 кВ Абаканская. Также модель включает параметры нагрузок реактивной и активной мощности. В цепи присутствуют устройства, компенсирующие реактивную мощность, конденсаторные батареи, шунтирующие реакторы. Удобство использованной модели в её наглядности. При изменении режима, значения перетоков мощностей, направления распространения активной и реактивной мощностей

отображается на графическом интерфейсе программы. Это делает модель легко «читаемой» для исследователя.

Включая и отключая компенсирующие устройства, мы можем проанализировать параметры сети, сравнить с предельно допустимыми значениями, увидеть функции компенсирующих устройств в электрической сети, а также определить потенциал и необходимость установки нового оборудования.

4 Расчет и анализ характерных режимов узла энергосистем

В нашем исследовании будут рассмотрены разные режимы работы компенсирующих устройств (управляемых шунтирующих реакторов и конденсаторных батарей) на ПС Чадан и ПС Кызылская. Как описано выше, на ПС Чадан 220 кВ установлены два управляемых шунтирующих реактора: на 45 Мвар и 26,3 Мвар. На ПС Кызылская 110 кВ установлен управляемый шунтирующий реактор на 14,2 Мвар.

Исследуемое напряжение будет проверено согласно национальному стандарту Российской Федерации «Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение от 1 до 750 кВ», представленному в таблице 2 [25].

Таблица 2 – Классы напряжения электрооборудования

Класс напряжения электрооборудования	Наибольшее рабочее напряжение электрооборудования	Номинальное напряжение электрической сети	Наибольшее длительно допускаемое рабочее напряжение в электрической сети
10	12,0	10,0	11,5
		11,0	12,0
110	126,0	110,0	126,0
220	252,0	220,0	252,0

4.1 Режимы работы УШР на ПС «Чадан» 220 кВ и ПС «Кызыльская» 220 кВ

С помощью программного комплекса моделирования электрических сетей RastrWin3 проведем анализ напряжения на подстанциях в следующих режимах:

А) шунтирующие реакторы включены на ПС «Чадан», включены на ПС «Кызыльская»;

Б) шунтирующие реакторы отключены везде: на ПС «Чадан», на ПС «Кызыльская»;

В) шунтирующие реакторы отключены на ПС «Кызыльская», включены на ПС «Чадан»;

Г) шунтирующие реакторы отключены на ПС «Чадан», включены на ПС «Кызыльская».

Компенсирующие устройства (включенные и отключенные) оказывают влияния на ВЛ 220 кВ ПС «Чадан» – ПС «Кызыльская», а также ВЛ ПС «Чадан» – ПС «Кызыльская» 110 кВ и подстанции находящиеся на ней. Среди них:

1. ПС «Чадан» 220 кВ, ПС «Чадан» 110 кВ, ПС «Чадан» 10 кВ;
2. ПС «Арыг-Узю» 110 кВ;
3. ПС «Шагонар» 110 кВ;
4. ПС «Межегей" 110 кВ;
5. ПС «Городская» 110 кВ;
6. отп. на ПС «Южная» 110 кВ;
7. ПС «Кызыльская» 110 кВ, ПС «Кызыльская» 220 кВ, ПС «Кызыльская» 10 кВ.

Рассмотрим значения напряжений в сети при изменении режима работы компенсирующих устройств режимов А-Г при разных нагрузках. Изменение нагрузок связано с их потенциальным влиянием на напряжение сети. Предполагается, что при увеличении нагрузок напряжение в сети должно

уменьшиться, а при уменьшении нагрузки – увеличиться. Так как нагрузки имеют ограничения, как по максимальному потреблению, так и по минимальному, нами было решено увеличивать\уменьшать их значения в 1,5 раза. Значение нагрузок в нормальном режиме представлены в приложении 1, где представлена характеристика узлов. В ходе работы с нагрузками, мы производили изменения, как с активной, так и с реактивной мощностью. Результаты исследования напряжения представлены с нормальной нагрузкой представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Напряжение на подстанциях с нормальной нагрузкой

ПС Режим	«Чадан» 220 кВ	«Чадан» 110 кВ	«Чадан» 10 кВ	«Арыг- Узю» 110 кВ	«Шагона р» 110 кВ	«Межеге й» 110 кВ	«Городск ая» 110 кВ	«Южная» 110 кВ	«Кызылс кая» 110 кВ	«Кызылс кая» 220 кВ	«Кызы лская» 10 кВ
А	227,4	118,9	11,1	118,3	118,2	117,8	117,8	117,6	117,6	237,5	11,2
Б	371,9	195,5	18,2	199,1	199,9	201,8	202,3	202,3	202,4	405,1	19,3
В	227,4	119,1	11,0	120	199,6	120,1	120,6	120,6	120,6	240,4	11,5
Г	372,1	195,6	18,1	199,3	200	202	202,4	202,5	202,5	405,2	19,3

- Режим А – шунтирующие реакторы включены на ПС «Чадан», включены на ПС «Кызылская» – отвечает требованиям к напряжению по длительно допустимой нагрузке;
- режим Б – шунтирующие реакторы отключены везде: на ПС «Чадан», на ПС «Кызылская» – не отвечает требованиям к напряжению по длительно допустимой нагрузке. Резкое увеличение напряжение за счет некомпенсированной зарядной мощности ВЛ 220 кВ Кызылская – Чадан;
- режим В – шунтирующие реакторы отключены на ПС «Кызылская», включены на ПС «Чадан» – отвечает требованиям к напряжению по длительно допустимой нагрузке, однако на ПС «Кызылская» некомпенсированная мощность проявляет себя в повышении, например, на низкой стороне трансформатора, где значение напряжение 11,5 кВ – близкое максимально допустимому по длительной допустимой нагрузке;
- режим Г – шунтирующие реакторы отключены на ПС «Чадан», включены на ПС «Кызылская» – не отвечает требованиям к напряжению по длительно допустимой нагрузке. Данный опыт подтверждает, что наличие управляемых шунтирующих реакторов на ПС Чадан необходимо для данного участка цепи, так как без них величина некомпенсированной реактивной мощности превышает максимально допустимую, не удовлетворяя требуемое напряжения в сети.

Рассмотрим следующие режимы. Повышая напряжение потребления в нагрузках, предполагаем уменьшение напряжения в сети. Данные режимов в повышенной нагрузкой в 1,5 раза представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Напряжение на подстанциях с нагрузкой в 1,5 выше нормальной

ПС Режим	«Чадан» 220 кВ	«Чадан» 110 кВ	«Чадан» » 10 кВ	«Арыг- Узю» 110 кВ	«Шагона р» 110 кВ	«Межеге й» 110 кВ	«Городск ая» 110 кВ	«Южная» 110 кВ	«Кызылс кая» 110 кВ	«Кызылс кая» 220 кВ	«Кызы лская» 10 кВ
А	227,4	118,8	11	118,3	118,1	117,7	117,7	117,6	117,6	235,8	11,2
Б	370,2	194,8	18,1	198,7	199,6	202,1	202,7	202,8	202,8	404,9	19,3
В	227,4	119,1	11	119,5	119,5	119,9	120,2	120,1	120,1	239,4	11,4
Г	335	175,6	16,3	177,1	117,4	178	178,2	178,2	178,2	357,9	16,9

Можем видеть, что выводы будут аналогичны предыдущим, так как уменьшение потребляемой мощности в 1,5 раза практически не влияет на сеть в данном случае:

- Режим А – шунтирующие реакторы включены на ПС «Чадан», включены на ПС «Кызылская» – отвечает требованиям к напряжению по длительно допустимой нагрузке для повышенной нагрузке;
- режим Б – шунтирующие реакторы отключены везде: на ПС «Чадан», на ПС «Кызылская» – не отвечает требованиям к напряжению по длительно допустимой нагрузке. Резкое увеличение напряжение за счет некомпенсированной зарядной мощности ВЛ 220 кВ Кызылская – Чадан;
- режим В – шунтирующие реакторы отключены на ПС «Кызылская», включены на ПС Чадан – отвечает требованиям к напряжению по длительно допустимой нагрузке, однако на ПС «Кызылская» некомпенсированная мощность проявляет себя в повышении, например, на низкой стороне трансформатора, где значение напряжение 11,4 кВ – близкое максимально допустимому по длительной допустимой нагрузке;
- режим Г – шунтирующие реакторы отключены на ПС «Чадан», включены на ПС «Кызылская» – не отвечает требованиям к напряжению по длительно допустимой нагрузке.

В целом, можно утверждать, что значения напряжения в сети практически не изменилось по сравнению с режимом нормальных нагрузок. Присутствует лишь небольшие снижения напряжения. Например, в режиме В на низкой стороне трансформатора напряжение равно 11,4 кВ, а значения при нормальной нагрузке было 11,5. Аналогично и на линии 110 и 220 кВ.

Рассмотрим следующие режимы. Уменьшая потребление в нагрузках, предполагаем повышение напряжения в сети. Данные режимов с уменьшенной в 1,5 раз нагрузкой представлены в таблице 5.

Таблица 5 –Напряжение на подстанциях с нагрузкой в 1,5 ниже нормальной

ПС Режим	«Чадан» 220 кВ	«Чадан» 110 кВ	«Чадан» 10 кВ	«Арыг- Узю» 110 кВ	«Шагона р» 110 кВ	«Межеге й» 110 кВ	«Городск ая» 110 кВ	«Южная» 110 кВ	«Кызылс кая» 110 кВ	«Кызылс кая» 220 кВ	«Кызы лская» 10 кВ
А	227,4	118,8	11	118,8	118,6	117,9	117,7	117,6	117,6	236,3	11,2
Б	372,9	196	18,2	199,3	200,1	201,6	201,9	201,9	202	405	19,3
В	227,4	119,2	11	120,4	120,6	120,9	121	121	121	241,3	11,5
Г	372,9	195,9	18,2	199,3	200,1	201,5	201,8	201,8	201,9	404,9	19,3

- Режим А – шунтирующие реакторы включены на ПС «Чадан», включены на ПС «Кызылская» – отвечает требованиям к напряжению по длительно допустимой нагрузке для пониженной нагрузки;
- режим Б – шунтирующие реакторы отключены везде: на ПС «Чадан», на ПС «Кызылская» – не отвечает требованиям к напряжению по длительно допустимой нагрузке. Резкое увеличение напряжение за счет некомпенсированной зарядной мощности ВЛ 220 кВ Кызылская – Чадан;
- режим В – шунтирующие реакторы отключены на ПС «Кызылская», включены на ПС «Чадан» – отвечает требованиям к напряжению по длительно допустимой нагрузке, однако на ПС «Кызылская» некомпенсированная мощность проявляет себя в повышении, например, на низкой стороне трансформатора, где значение напряжение 11,4 кВ – близкое максимально допустимому по длительной допустимой нагрузке;
- режим Г – шунтирующие реакторы отключены на ПС «Чадан», включены на ПС «Кызылская» – не отвечает требованиям к напряжению по длительно допустимой нагрузке.

Выводы в ходе исследования режимов будут сделаны согласно таблице максимальных значений напряжения по длительно допустимой нагрузке из национального стандарта. Нас интересует класс напряжения электрооборудования 10 кВ, 110 кВ и 220 кВ. Наибольшее длительно допускаемое напряжение в этих классах напряжения соответственно 11,5 кВ, 126 кВ и 252 кВ. Согласно полученным данным напряжения можем утверждать, что приемлемы следующие режимы:

Таблица 3 – только режим А (включены все УШР на ПС Чадан и ПС Кызылская);

Таблица 4 – только режимы А и В (включены все УШР на ПС Чадан и ПС Кызылская, включены только на ПС Чадан);

Таблица 5 – только режимы А и В (включены все УШР на ПС Чадан и ПС Кызылская, включены только на ПС Чадан).

Таким образом, можем сделать вывод, что приемлемыми режимами считаются лишь режимы, при которых включены реакторы на ПС «Чадан». Реактор на ПС «Кызылская» 110 кВ вносит свою лепту в улучшение режима, но и без него напряжения не превышают критические значения.

4.2 Режимы работы УШР на ПС «Чадан» 220 кВ

Рассмотрим влияние УШР установленных на ПС Чадан 220 кВ на энергоузел ПС «Кызылская» – ПС «Чадан». Проведем исследование напряжение в сети в режим с нормальной нагрузкой, так как влияние на существенное изменение напряжение при увеличении и снижении потребляемой мощности на подстанциях, не выявлено. Следующие режимы отличаются тем, что включение шунтирующих реакторов на ПС «Чадан» будет происходить неодновременно:

- при включенном реакторе только УШР1 на 51,1 Мвар на ПС «Чадан» кВ – режим 1;
- при включенном реакторе только УШР2 на 32,4 Мвар на ПС «Чадан» 220 кВ – режим 2.
- нулевым режимом («0») обозначен режим работы, при котором включены оба реактора на ПС «Чадан» и реактор на ПС «Кызылская».

Результаты одновременного включения реакторов на ПС «Чадан» 220 кВ представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Режимы работы УШР на ПС Чадан 220 кВ

ПС Режим	«Чадан» 220 кВ	«Чадан» 110 кВ	«Чадан» 10 кВ	«Арыг- Узю» 110 кВ	«Шагонар » 110 кВ	«Межегей » 110 кВ	«Городск ая» 110 кВ	«Южная » 110 кВ	«Кызылска я» 110 кВ	«Кызылск ая» 220 кВ	«Кызыл ская» 10 кВ
0	227,4	118,9	11,1	118,3	118,2	117,8	117,8	117,6	117,6	237,5	11,2
1	293,9	154,3	14,3	156,8	157,3	158,6	159,1	159,1	159,1	317,5	15,2
2	293,9	154,3	14,3	157,3	157,3	158,6	159,1	159,1	159,1	317,5	15,2

Можем видеть, что УШР1 на 51,1 Мвар и УШР2 на 32,4 Мвар в данном случае практически одинаково влияют на значения напряжения рассматриваемой линии. Кроме того, можем сказать, что и в 1 и во 2 режимах значения напряжения не входят в пределы длительно допускаемых рабочих напряжений. Это значит, что их работа предполагается совместной на всем протяжении времени.

4.3 Режимы работы БСК на ПС «Кызылская» 110 кВ

Рассмотрим режимы, в которых подключены конденсаторные батареи на ПС «Кызылская» 110 кВ. Условно назовем эти режимы:

Д – режим работы, в котором подключена одна конденсаторная батарея;

Е – режим работы, в котором подключены обе конденсаторные батареи.

Обе конденсаторные батареи на ПС Кызылская 110 кВ стоят на одинаковую номинальную мощность. Генерируемая мощность каждой батареи составляет 26 Мвар. Поэтому включение что одной, что другой батареи – равноценно для изменения режима сети. Переключение будем выполнять с включенным шунтирующим реактором на ПС Кызылская 110 кВ. Кроме того, предыдущий опыт показал, что изменение (увеличение/уменьшение) нагрузки влияние на напряжение практически не оказывает. Поэтому рассматривать режимы Д, Е мы будем с нормальной нагрузкой, заданной в RastrWin3. Результаты измерений представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Режимы работы конденсаторных батарей на ПС Кызылская 110 кВ

ПС Режим	«Чадан» 220 кВ	«Чадан» 110 кВ	«Чадан» 10 кВ	«Арыг- Узю» 110 кВ	«Шагона р» 110 кВ	«Межеге й» 110 кВ	«Городск ая» 110 кВ	«Южная» 110 кВ	«Кызылс кая» 110 кВ	«Кызылс кая» 220 кВ	«Кызыл ская» 10 кВ
0	227,4	118,9	11,1	118,3	118,2	117,8	117,8	117,6	117,6	237,5	11,2
Д	227,4	119,3	11,0	120,8	121,0	121,9	122,2	122,2	122,3	242,8	11,7
Е	219,4	116,1	10,8	120,3	121,4	124,8	126,0	126,0	126,1	245,7	12,0

Как видно из таблицы, при включенных конденсаторных батареях происходит увеличение напряжения в рассматриваемом участке сети. Согласно таблицы 2 приведенного стандарта, напряжение на участке цепи входит в допустимые пределы напряжения на всех подстанциях, однако на ПС «Кызылская» на стороне 10 кВ превышает 11,5 кВ значением 11,7 кВ.

При включении 2-ух конденсаторных установок напряжение на ПС «Чадан» 220 кВ снижается, однако на линии 110 кВ происходит увеличение выше наибольшего допустимого 126,0 при длительной нагрузке. Также на ПС «Кызылская» превышает 11,5 кВ.

Данные режимы предположительно осложняются увеличением напряжения в сети при отключенном реакторе на ПС Кызылская 110 кВ. Приведем данные напряжений таких режимов в соответствующей им таблице 8 с обозначением Д2 и Е2, где Д2 – режим подключения одной конденсаторной батареи, а Е2 – режим подключения двух конденсаторных батарей.

Таблица 8 – Режимы работы конденсаторных батарей на ПС «Кызылская» 110 кВ при отключенном реакторе

ПС Режим	«Чадан» 220 кВ	«Чадан» 110 кВ	«Чадан» 10 кВ	«Арыг- Узю» 110 кВ	«Шагонар » 110 кВ	«Межегей » 110 кВ	«Городска я» 110 кВ	«Южная» 110 кВ	«Кызылск ая» 110 кВ	«Кызылск ая» 220 кВ	«Кызыл ская» 10 кВ
0	227,4	118,9	11,1	118,3	118,2	117,8	117,8	117,6	117,6	237,5	11,2
Д2	227,5	120,1	11,1	123,8	124,8	127,6	128,6	128,7	128,8	252,2	12,3
Е2	227,2	88,4	8,8	72,5	75,2	112,7	131,2	132,9	135,0	220,7	13,2

Генерируемая реактивная мощность конденсаторных батарей без компенсации шунтирующего реактора оказывается слишком большой. Этим режимам соответствует повышение напряжения на близлежащей линии к ПС «Кызылская» на всех уровнях напряжения: 220 кВ, 110 кВ и 10 кВ. В режиме работы 2-ух конденсаторных батарей происходит «аномалия», связанная с понижением напряжения близ ПС Чадан, хотя присоединения второй батареи на самом деле должно бы увеличить значение напряжений на всей протяженности линии. Аналогичная ситуация прослеживается в режиме, где работает шунтирующий реактор на ПС «Кызылская» 110 кВ (таблица 6), но уменьшение напряжения в меньшем масштабе. Данное уменьшение напряжения близ ПС «Чадан» 110 кВ объясняется наличием включенных двух мощных шунтирующих реакторов на ПС «Чадан» 220 кВ, потребляющих реактивную мощность и снижающих реактивную мощность и, соответственно, напряжение на ПС Чадан и приближенных к ней подстанций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Федоров А. А., Старкова Л. Е. Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования по электроснабжению промышленных предприятий; Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.; ил.
2. Долгополов А., Ивакин В. Управляемые шунтирующие реакторы. Обзор и сравнительные характеристики // Новости электротехники. – 2013. – №6 (84).
3. СТО 4.2–07–2014. Система менеджмента качества. Общие требования к построению, изложению и оформлению документов учебной деятельности. – Красноярск : ИПК СФУ, 2014. – с.59
4. Требования к содержанию, объему и структуре бакалаврской работы / Н. В. Дулесова [и др.]; - Абакан, 2015. – 56 с.
5. Выпускная квалификационная работа по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»: метод. Указания / сост. Н. В. Дулесова : Сиб. федер. ун-т, ХТИ – филиал СФУ. – Абакан: Ред. – изд. Сектор ХТИ – филиала СФУ, 2017. – 56 с.
6. Методика расчета технико-экономической эффективности применения устройств FACTS в ЕНЭС России (СТО 56947007-29.240.019-2009).
7. Кондратенко Д.В. Повышение эффективности применения УШР на ЛЭП 500 кВ и ПС 110 кВ электроэнергетической системы: дис. канд. техн. наук. 051402 / Денис Олегович Кондратенко; Москва. НИУ «МЭИ», 2015. – 164 л.
8. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью, ОАО «ФСК ЕЭС» 2012. – 51 с.
9. Шакарян Ю.В., Новиков Н.Л. Технологическая платформа Smart Grid // Энергоэксперт. – 2009. - №4.

10. Авилов, В. Д. Целевой энергетический мониторинг эффективности использования ТЭР структурными подразделениями железных дорог [Текст] / В. Д. Авилов, Е. А. Третьяков, А. Г. Звягинцев // Известия Транссиба / Омский гос. университет путей сообщения. – Омск. – 2012, - № 1 (9). – С. 59 – 69.
11. Манусов, В. З. Исследование методов снижения несимметрии загрузки трехфазной сети на тяговых подстанциях скоростных железных дорог переменного тока [Текст] / В. З. Манусов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. - № 2 (10). –С.87-93.
12. Третьяков Е. А., Краузе А. В., Ткач В. А. Поглощение избыточной зарядной мощности в протяженных малозагруженных линиях электропередач 110 кВ // Известия Транссиба -2013. - № 2 (14).
13. Долгополов А.Г., Сорокин С.Е. Управляемые реакторы. Обзор технологий // Новости Электротехники. – 2012 - №3 (75).
14. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы, Г.А. Евдокунин, Санкт-Петербург 2013. – 276 с.
15. Герасименко А. А. Передача и распределение электрической энергии: Учебное пособие/ А. А. Герасименко, В. Т. Федин. – Ростов-н/Д.: Феникс; Красноярск: Издательские проекты, 2006. – 720 с. (Серия «Высшее образование»).
16. Электрические системы: Под ред. В.А. Веникова – Москва: Высшая школа, 1971. – 438с.
17. Кудрин Б. И. Системы электроснабжения : учеб. пособие для студ. учреждений высшего проф. образования / Б. И. Кудрин. – М. : Издательский центр «Академия», 2011. – 352 с.
18. Брянцев А.М., Базылев Б.И., Лурье А.И., Смолвик С.В. Регулирование с тсабилизация напряжения высоковольтной электрической сети управляемыми источниками реактивной мощности индуктивно-емкостного типа//Электричества. – 2012. - №10.

19. Брянцев А.М., Брянцев М.А. и др. Высоковольтные реверсивные источники реактивной мощности на базе управляемых подмагничивание шунтирующих реакторов//Энергетика. – 2010. - №4(35).
20. Пат. 2334046 Российская Федерация, МПК H02J3/16 H01F29. Источник реактивной мощности / А.М. Брянцев, 2008.
21. Зарядная мощность – линия: сайт большой энциклопедия нефти и газа. [Электронный ресурс]. URL: ngpedia.ru (дата обращения 1.07.2021).
22. Электротехника: Что такое зарядный ток в линии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cb2000.ru>, свободный. – Загл. с экрана.
23. Воротницкий В.Э. Энергетическая эффективность и компенсация реактивной мощности в электрических сетях. Проблемы и пути решения // Энергосовет - 2007 -№1 (47).
24. Неуймин В.Г., Машалов Е.В. Программный комплекс «RastrWin3» Руководство пользователя // -2012- 243 с.
25. ГОСТ Р 55195-2012. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ // Москва – 2014 – 43 с.

окончание приложения 2

88	<input type="checkbox"/>	✗	Выкл	60513...	60513...			ПС 220 кВ Ергаки 1сек 35 - ПС 220 кВ Ергаки БСК-1								605			
89	<input type="checkbox"/>	✗	Выкл	60513...	60513...			ПС 220 кВ Ергаки 2сек 35 - ПС 220 кВ Ергаки БСК-2								605			
90	<input type="checkbox"/>		Выкл	60513...	60513...			ПС 220 кВ Ергаки 3сек 220 - ПС 220 кВ Ергаки УШР-220								-25	605	60	9,9
91	<input type="checkbox"/>		Тр-р	60513...	60513...			ПС 220 кВ Ергаки средняя точка 1Т - ПС 220 кВ Ергаки 1сек-10	3,86	123,...		0,0...					605	11	1,8
92	<input type="checkbox"/>	✗	Тр-р	60513...	60513...			ПС 220 кВ Ергаки средняя точка 2Т - ПС 220 кВ Ергаки 2сек-10	3,80	122,...		0,0...					605		
93	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	60513...	60513...			ПС 220 кВ Шушенская-опорная 2СШ 220 - ПС 220 кВ Ергаки 4се...	15,...	53,83	-331,5			1	1	605	45	7,5	
94	<input type="checkbox"/>		Тр-р	61123...	61123...			ПС 220 кВ Камышта СШ1-220 - ПС 220 кВ Камышта ср. точка 1Т	4,27	168,...	3,8	1,0...		-7	-7	611	24	23,4	
95	<input type="checkbox"/>		Тр-р	61000...	61000...			ПС 220 кВ Ак-Довурак 1сек-220 - ПС 220 кВ Ак-Довурак средняя...	1,65	97,40	2,4	1,0...		-1	-1	610	3	1,7	
96	<input type="checkbox"/>		Тр-р	61000...	61000...			ПС 220 кВ Ак-Довурак средняя точка 1АТ - ПС 220 кВ Ак-Довур...	10,...	225,...		0,0...		-1	-1	610	88	3,3	
97	<input type="checkbox"/>	✗	Выкл	61000...	61000...			ПС 220 кВ Ак-Довурак 1сек ПРУ-6 - ПС 220 кВ Ак-Довурак СК1								610			
98	<input type="checkbox"/>		Тр-р	61000...	61000...			ПС 220 кВ Ак-Довурак средняя точка 2АТ - ПС 220 кВ Ак-Довур...	3,47	5,88		0,4... 18	610...	-2	-16	610	84	29,2	
99	<input type="checkbox"/>	→	Тр-р	61000...	61000...			ПС 220 кВ Ак-Довурак средняя точка 1АТ - ПС 220 кВ Ак-Довур...	3,56	5,04		0,4... 18	610...			610			
100	<input type="checkbox"/>		Выкл	61000...	61000...			ПС 220 кВ Ак-Довурак 1сек-220 - ПС 220 кВ Ак-Довурак 2 сек-220						-40	-29	610	123	15,1	
101	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	61000...	61000...			ПС 220 кВ Ак-Довурак 2 сек-220 - ПС 220 кВ Чадан СШ Д-43	6,90	29,75	-189,1			-37	-12	610	107	15,1	
102	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	61111...	61123...			ПС 500 кВ Абаканская 2сек.220 - ПС 220 кВ Камышта СШ2-220	5,53	30,52	-202,2			-67	16	611	162	19,7	
103	<input type="checkbox"/>		Выкл	61123...	61123...			ПС 220 кВ Камышта СШ2-220 - ПС 220 кВ Камышта СШ1-220						-66	6	611	158		
104	<input type="checkbox"/>	✗	Тр-р	61123...	61123...			ПС 220 кВ Камышта СШ2-220 - ПС 220 кВ Камышта ср. точка 2Т	4,02	151,...	4,0	1,0...				611			
105	<input type="checkbox"/>		Тр-р	61111...	61111...			ПС 500 кВ Абаканская ср. точка 2АТ - ПС 500 кВ Абаканская 2А...	1,42	44,86		0,0...				611	3	1,0	
106	<input type="checkbox"/>	✗	Тр-р	61111...	61111...			ПС 500 кВ Абаканская ср. точка 1АТ - ПС 500 кВ Абаканская 1с...	0,14	-3,46		0,4... 8	611...			611			
107	<input type="checkbox"/>	✗	Тр-р	61123...	61123...			ПС 220 кВ Камышта ср. точка 2Т - ПС 220 кВ Камышта Т2 сек-2...	2,06			0,1...				611			
108	<input type="checkbox"/>	✗	Тр-р	61123...	61190...			ПС 220 кВ Камышта ср. точка 2Т - ПС 220 кВ Камышта 2Т сек-3...	3,18	114,...		0,1...				611			
109	<input type="checkbox"/>	✗	Выкл	61111...	61111...			ПС 500 кВ Абаканская 1сек. 500 - ПС 500 кВ Абаканская Р-1-500								611			
110	<input type="checkbox"/>		Тр-р	61111...	61111...			ПС 500 кВ Абаканская ср. точка 2АТ - ПС 500 кВ Абаканская 2с...	0,13	-3,68		0,4... 8	611...	-67	16	611	162	8,2	
111	<input type="checkbox"/>		Тр-р	61000...	61000...			ПС 220 кВ Ак-Довурак средняя точка 2АТ - ПС 220 кВ Ак-Довур...	9,86	217,...		0,0...		-1		610	72	2,7	
112	<input type="checkbox"/>		Тр-р	61000...	61000...			ПС 220 кВ Ак-Довурак 2 сек-220 - ПС 220 кВ Ак-Довурак средняя...	1,57	101,...	2,3	1,0...		-3	-17	610	43	28,5	
113	<input type="checkbox"/>	✗	Выкл	61000...	61000...			ПС 220 кВ Ак-Довурак 1сек ПРУ-6 - ПС 220 кВ Ак-Довурак 2сек ...								610			
114	<input type="checkbox"/>		Выкл	61000...	61000...			ПС 220 кВ Ак-Довурак 2 сек-110кВ - ПС 220 кВ Ак-Довурак 1 сек...								610			
115	<input type="checkbox"/>	✗	Выкл	61000...	61000...			ПС 220 кВ Кызылская 2сек-10 - ПС 220 кВ Кызылская 1сек-10								610			
116	<input type="checkbox"/>	✗	Выкл	61000...	61000...			ПС 220 кВ Чадан 1сек-10 - ПС 220 кВ Чадан 2сек-10								610			
117	<input type="checkbox"/>	✗	Выкл	61000...	61000...			отп. на ПС 110 кВ Южная - отп. на ПС 110 кВ Южная								610			
118	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	61000...	61000...			ПС 220 кВ Кызылская 1СШ 110 - отп. на ПС 110 кВ Вавилинская...	0,09	0,28	-2,0		1			610	3	1,0	
119	<input type="checkbox"/>	✗	Тр-р	61111...	61111...			ПС 500 кВ Абаканская 1сек. 500 - ПС 500 кВ Абаканская ср. точ...	0,38	29,42	10,6	1,0...				611			
120	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	61000...	61000...			ПС 220 кВ Кызылская 2СШ-110 - отп. на ПС 110 кВ Вавилинская...	0,09	0,28	-2,0		1	-2		610	11	3,3	
121	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	61000...	61000...			отп. на ПС 110 кВ Вавилинская 44 - Кызылская ТЭЦ 1 сек 110 кВ	0,01	0,03	-0,2		1			610	5	1,7	
122	<input type="checkbox"/>	✗	Тр-р	61111...	61111...			ПС 500 кВ Абаканская ср. точка 1АТ - ПС 500 кВ Абаканская 1А...	1,10	42,67		0,0...				611			
123	<input type="checkbox"/>	✗	Выкл	61000...	61000...			Кызылская ТЭЦ 2сек 110 кВ - Кызылская ТЭЦ 1 сек 110 кВ								610			
124	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	61190...	61190...			ПС 220 кВ Абаза 1сек-220 - ПС 220 кВ Асиз СШ 220	8,79	37,11	-236,1		52	8		611	127	20,1	
125	<input type="checkbox"/>		Тр-р	61190...	61190...			ПС 220 кВ Абаза 1сек-220 - ПС 220 кВ Абаза ср. точка 1Т	10,...	304,...	10,4	1,0...		-5	-4	611	16	32,5	
126	<input type="checkbox"/>		Тр-р	61190...	61190...			ПС 220 кВ Абаза ср. точка 1Т - ПС 220 кВ Абаза 1Т сек-6 кВ	6,67	157,...		0,0...				611	12	1,8	
127	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	61000...	61000...			отп. на ПС 110 кВ Вавилинская 44 - Кызылская ТЭЦ 2сек 110 кВ	0,01	0,03	-0,2		1	-2		610	11	3,4	
128	<input type="checkbox"/>	✗	Выкл	61000...	61000...			отп. на ПС 110 кВ Вавилинская 44 - отп. на ПС 110 кВ Вавилинс...								610			

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Хакасский технический институт – филиал
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
институт

Электроэнергетика
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

Г. Н. Чистяков
подпись инициалы, фамилия

«15» 07 20 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.02. «Электроэнергетика и электротехника»
код и наименование специальности

Проблемы компенсации зарядной мощности протяженных линий
тема
на примере ВЛ 220 кВ ПС «Кызылская» – ПС «Чадан»

Руководитель

Е. В. Платонова
подпись, дата

к. т. н., доцент

кафедры ЭЭ

ученая степень, должность

Е. В. Платонова
инициалы, фамилия

Выпускник

Д. Ю. Лапин
подпись, дата

Д. Ю. Лапин
инициалы, фамилия

Нормоконтролер

И. А. Кычакова
подпись, дата

И. А. Кычакова
инициалы, фамилия

Абакан 2021