

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
САЯНО-ШУШЕНСКИЙ ФИЛИАЛ

институт  
Гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических систем и  
электрических сетей  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

А.А. Ачитаев

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ »

\_\_\_\_\_ 2022г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

**ОПТИМИЗАЦИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ОГРАНИЧЕНИЙ  
КАСКАДА ВЫГСКИХ ГЭС**

13.04.02. Электроэнергетика и электротехника

код и наименование направления

13.04.02.06. Гидроэлектростанции

код и наименование магистерской программы

Научный руководитель

профессор кафедры  
ГГЭС Саяно-  
Шушенский филиал  
СФУ, д-р. техн. наук

М.Ф. Носков

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Выпускник

\_\_\_\_\_

В.А. Дружинин

\_\_\_\_\_

Рецензент

профессор кафедры  
Теоретических основ  
радиотехники НГТУ, д-р.  
техн. наук

В.П. Разинкин

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Нормоконтроль

\_\_\_\_\_

К.П. Синельникова

\_\_\_\_\_

Саяногорск, Черемушки 2022

## АННОТАЦИЯ

**Тема магистерской диссертации:** Оптимизация мероприятий по снижению ограничений каскада Выгских ГЭС

**Объём диссертации:** составляет 45 страниц, 9 рисунков и 8 таблиц.

**Объектом исследования** при написании диссертации является потенциал использования водных ресурсов Каскада Выгских ГЭС.

**Предметом исследования** является решение снижению ограничений на действующих ГЭС.

**Ключевые слова:** каскад ГЭС, водноэнергетический режим, АОПО, RastrWin, режим работы, математическая модель, водохранилище.

**Публикации:** По основным результатам опубликовано 2 печатные работы.

Магистерская диссертация состоит из аннотации, автореферата, содержания, введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и списка использованных источников.

Во введении осуществляется обзор работ, посвящённых подобной тематике, осуществляется постановка цели и задач.

Первая глава посвящена основным понятиям, характеристикам и особенностям режимов работы ГЭС, режимам работы ГЭС в каскаде, обзору подобных исследований.

Вторая глава посвящена описанию действующих ограничений.

В третьей главе изложены анализ проблемы и рассмотрены несколько вариантов модернизации.

В четвертой главе изложены результаты по оценкам надежности генерации после установки оборудования.

В пятой главе проведены статической устойчивости, доказывающие обоснованность установки оборудования. Заключение содержит основные выводы по результатам проведенной работы.

## АВТОРЕФЕРАТ

Надёжность системы электроснабжения можно определить, как способность этой системы и ее отдельных элементов обеспечивать бесперебойное питание электроэнергией промышленное предприятие, не приводящее к срыву производства и к авариям в электрической и технологической частях.

Надежность характеризуется повреждаемостью оборудования, ожидаемой продолжительностью бесперебойной работы, длительностью перерыва питания электроэнергией, а также ущербом от перерыва питания и другими факторами.

Большое значение для обеспечения бесперебойного питания и успешной ликвидации аварии имеет правильная эксплуатация электрохозяйства промышленных предприятий.

Одной из главных проблем в системах электроснабжения является обеспечение оптимальной надёжности этих систем, при которой приведенные ежегодные затраты, включая ущерб от перерывов электропитания, будут минимальны.

Эксплуатация Каскада Выгских ГЭС показала существование ряда холостых водосбросов в эксплуатации в периоды 2020-2021 годов. Сброс обусловлен установленными ограничениями от Системного оператора. Это приводит к понижению надежности генерирующей организации и упущению денежных средств.

Поиск наиболее подходящего решения проблемы стали предметом данного исследования, основанного на выборе оптимального варианта по компоновки оборудования противоаварийной автоматики на станциях Выгского Каскада.

Автором было предложено, рассмотреть различные варианты по снятию ограничений Системного оператора и возможности установки оборудования. Сравнить уровни надежности энергообъекта до модернизации и после.

## **ABSTRACT**

Final qualification work in the form of a master's thesis on "Modeling the operation of a hydroelectric power station cascade in MATLAB Simulink".

The reliability of the power supply system can be defined as the ability of this system and its individual elements to provide uninterrupted power supply to an industrial enterprise that does not lead to disruption of production and accidents in the electrical and technological parts.

Reliability is characterized by equipment damage, expected uptime, duration of power outages, damage from power outages, and other factors.

Of great importance for ensuring uninterrupted power supply and successful elimination of an accident is the correct operation of the electrical facilities of industrial enterprises.

One of the major challenges in power supply systems is to ensure that systems are optimally reliable so that the annual costs, including damage from power outages, are minimized.

The operation of the Vygskiy HPPs Cascade showed the existence of a number of idle spillways in operation in the periods of 2020-2021. The reset is due to the established restrictions from the System Operator. This leads to a decrease in the reliability of the generating organization and the loss of funds.

The search for the most suitable solution to the problem became the subject of this study, based on the choice of the optimal option for the layout of emergency automation equipment at the stations of the Vygsky Cascade. The author proposed to consider various options for removing the restrictions of the System Operator and the possibility of installing equipment. Compare the levels of reliability of the power facility before and after modernization.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1.2 Режимы использования водных ресурсов.....	9
1.3 Сегозерское водохранилище .....	10
1.4 Выгозерско-Ондское водохранилище .....	11
1.5 Палагорское водохранилище.....	11
1.6 Маткожненское водохранилище .....	11
1.7 Выгостровское водохранилище.....	12
2. Об упущенной выгоде по ГЭС Выгского каскада в 2019 и 2020 году.....	13
2.1 Анализ необходимых исходных данных и режимных ограничений ГЭС ....	13
3. Анализ и выбор среди различных решений проблемы ограничений по загрузке ВЛ .....	16
3.1 Нормальная схема и единичные ремонтные схемы сети ВЛ 110 кВ Маткожненская гэс – Идель (Л-102) или ВЛ 110 кВ Маткожненская ГЭС– Палакоргская ГЭС (Л-103) или ВЛ 110 кВ Ондская ГЭС – Палакоргская ГЭС (Л-111) или ВЛ 110 кВ Ондская ГЭС – Идель (Л-112).....	17
3.2 Двойные ремонтные схемы ВЛ 110 кв Ондская ГЭС -Палакоргская ГЭС (Л-111) и (или) транзита 110 кВ Ондская ГЭС -Идель-Маткожненская ГЭС и ВЛ110 кВ беломорская ГЭС -Беломорск (Л-113) (ВЛ 110 кВ Маткожненская ГЭС - Беломорская ГЭС (Л-104)) или ВЛ 110 кВ Выгостровская ГЭС - Беломорск (Л-114) (ВЛ110 кВ Маткожненская ГЭС - Выгостровская ГЭС (Л-105)).....	19
3.3 Нормальная схема и единичные ремонтные схемы сети с отключением ВЛ 110 кВ Маткожненская ГЭС – Идель (Л-102) или ВЛ 110 кВ Маткожненская ГЭС – Палакоргская ГЭС (Л-103) или ВЛ 110 кВ Ондская ГЭС – Палакоргская ГЭС (Л-111) или ВЛ110 кВ Ондская гэс – Идель (Л-112).....	20
3.4 Анализ выбора наиболее оптимального варианта реализации .....	22
3.5 Выбор оборудования для реализации проекта.....	23
4. Надежность обеспечения генерирующей мощностью.....	27
4.1 Оценка надежности обеспечения генерирующей мощностью.....	29
4.2 Экономический эффект от установки оборудования .....	31
5. Анализ статической устойчивости.....	33
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	41
Приложение А Сравнительные экономические результаты работы Каскада Выгских ГЭС после установки оборудования и без установки оборудования за 26.03.2020.....	44

## ВВЕДЕНИЕ

Многие гидроэлектростанции, входящие в состав ПАО «ТГК-1», были введены в эксплуатацию еще в прошлом веке. Оборудование таких ГЭС в значительной мере морально устарело, в связи, с чем нуждается в модернизации и замене. В полной мере это относится к оборудованию релейной защиты и автоматики.

Назначением гидроэлектростанций Выгского каскада является выработка электроэнергии и участие в покрытии электрической нагрузки энергосистемы с учетом ее суточной и сезонной неравномерности. При этом должны быть обеспечены нормальные условия судоходства в период навигации, сохранность сооружений ГЭС и ББК в период зимних внутрисуточных колебаний уровней воды в бьефах ГЭС и водохранилищах, сохранение и воспроизводство рыбных запасов, а также условия, обеспечивающие возможную срезку пиков половодий.

В процессе научного исследования автор опирался на основную цель диссертации, указать, как можно снять имеющиеся ограничения системного оператора, и тем самым, уменьшить нерентабельное использование водной энергии. Ограничения по загрузке ВЛ 110 кВ Кемь-Беломорск (Л-115) не позволяет сбалансировать нагрузку на станциях, исходя из этого теряется часть вырабатываемой мощности каскада Выгских ГЭС. Замена оборудования позволит повысить надёжность энергопредприятий и получить максимальную экономическую прибыль, путём снижения холостых водосбросов в периоды весенних половодий.

Для достижения сформулированной цели поставлены следующие задачи:

- исследование общих сведений об уже имеющимся оборудовании;
- провести сопоставление нескольких вариантов по снятию ограничений;
- разработка технического решения по установке оборудования;

– обоснование решения и целесообразности модернизации оборудования.

В настоящей работе проведено сопоставление нескольких вариантов по снятию ограничений Системного оператора, предъявленных Выгскому каскаду ГЭС, и рассчитаны водноэнергетические режимы с целью сравнения уменьшения объемов холостых водосбросов, и проведены расчеты по показателям индексов надежности и экономических индексов энергообъектов, до и после модернизации.

В ходе исследований были приведены результаты, обладающие практической значимостью:

- сопоставлены различные варианты и выбран наиболее оптимальный вариант по модернизации;
- предложена компоновка оборудования на каскаде Выгских ГЭС;
- рассчитана сравнительная экономическая эффективность до установки и после установки.

Поскольку данная работа решает проблемы уже действующих гидроэлектростанций, то основы этой работы могут применяться, для максимально прикладного характера исследования автора.

Структура предлагаемой работы последовательно раскрывает сущность значимость каскада Выгских в энергосистеме Республики Карелии, и содержит развернутый анализ имеющихся водных ресурсов (глава 1), указана упущенная выгода от недоотпуска электроэнергии (глава 2), рассмотрены несколько возможных вариантов по компоновки и модернизации имеющегося оборудования энергообъектов (глава 3).

Завершает работу раздел о практическом применении полученных результатов с приведением индексов надежности и экономических показателей.

Вследствие проведения исследования на стыке ряда различных наук и технических отраслей были привлечены различные источники необходимых сведений, включая периодическую литературу и Интернет-ресурсы. Огромный

вклад в проведении исследования также осуществили научные сотрудники Носков М.Ф. (научный руководитель автора), и Конев Р.В. (научный руководитель от предприятия) опыт и компетенции которых оказались весьма востребованы входе подготовки настоящей работы.



## **1. Основные понятия, характеристики и особенности режимов ГЭС. Режимы работы ГЭС в каскаде, обзор подобных исследований**

### **1.1. Общие представления**

Выг — река в России, протекает по территории Карелии. Длина реки — 237 км, площадь водосборного бассейна — 27 100 км<sup>2</sup>. Средний расход воды — 323 м<sup>3</sup>/с. Высота истока — 167 м над уровнем моря.

Установленные мощности станций:

Маткожненская ГЭС (ГЭС-3) – 63 МВт;

Выгостровская ГЭС (ГЭС-5) – 40 МВт;

Беломорская ГЭС (ГЭС-6) – 27 МВт;

Палакоргская ГЭС (ГЭС-7) – 30 МВт;

Суммарная установленная мощность каскада – 160 МВт.

### **1.2 Режимы использования водных ресурсов**

Назначением гидроэлектростанций Выгского каскада и Ондской ГЭС является выработка электроэнергии и участие в покрытии электрической нагрузки энергосистемы с учетом ее суточной и сезонной неравномерности. При этом должны быть обеспечены нормальные условия судоходства в период навигации, сохранность сооружений ГЭС и ББК в период зимних внутрисуточных колебаний уровней воды в бьефах ГЭС и водохранилищах, сохранение и воспроизводство рыбных запасов, а также условия, обеспечивающие возможную срезку пиков половодий.

Суммарная регулирующая емкость Сегозерского и Выгозерско-Ондского водохранилищ позволяет проводить компенсированное многолетнее регулирование стока. Палакоргское, Маткожненское, Выгостровское и Беломорское водохранилища вследствие их незначительной полезной емкости, обеспечивают только суточное регулирование стока.

Компенсированное регулирование стока с Выгского бассейна производится для обеспечения суммарной гарантированной отдачи ГЭС Выгского каскада и Ондской ГЭС 125,0 МВт, обеспеченностью 95%, определенной при уровне сработки Выгозерско-Ондского водохранилища 88,70 м. Этим требованиям соответствует расход Ондской ГЭС – 175 м<sup>3</sup>/с и Маткожненской ГЭС – 200 м<sup>3</sup>/с.

### **1.3 Сегозерское водохранилище**

Сегозерское водохранилище осуществляет многолетнее компенсированное регулирование стока. Величина попусков из Сегозерского водохранилища для энергетических целей определяется разностью между расходами Ондской ГЭС, требующимися для обеспечения гарантированной мощности, и расходами боковой приточности в Выгозерско-Ондское водохранилище.

При определении попусков необходимо руководствоваться следующими положениями:

а) размер минимального попуска определяется необходимостью поддержания гарантированной мощности Ондской ГЭС и каскада Выгских ГЭС и производится по усмотрению Филиала «Карельский».

б) при достижении уровня Выгозерско-Ондского водохранилища минимальной навигационной отметки 89,20 м в период навигации и недостаточном боковом притоке разрешается увеличивать расход воды через Сегозерский гидроузел до 250 м<sup>3</sup>/с, величина расхода ограничена по состоянию русла и прибрежной инфраструктуры;

в) максимальный сбросной расход ограничен величиной 350 м<sup>3</sup>/с по условиям пропуска воды в створе моста через реку Сегежу на автодороге Уросозеро - Попов Порог.

Санитарный расход в устье р. Сегежи, обеспечивающий питьевое водоснабжение города Сегежи, принят 25 м<sup>3</sup>/с.

#### **1.4 Выгозерско-Ондское водохранилище**

Выгозерско-Ондское водохранилище осуществляет сезонное регулирование стока. Ежегодно весной филиалом «Карельский», совместно с ФГУ «Беломорканал», на основании прогноза притока рассчитываются схемы пропуска весеннего половодья и наполнения водохранилищ с учетом необходимости наполнения Выгозерско-Ондского водохранилища к началу навигации до навигационных отметок 89,15-89,20 м.

#### **1.5 Палагорское водохранилище**

В период навигации уровни воды в водохранилище поддерживаются на отметках: максимальной – 60,30 м и минимальной в нормальных условиях работы ГЭС – 60,20 м. При внезапном изменении режима работы ГЭС разрешается кратковременное, (не более 5 часов), понижение уровней воды у шлюза № 12 до отметки 60,15 м. Кроме того, допускается понижения уровня воды, произошедшего в результате ветрового сгона, который при расчетном ветре достигает 10 см и может вызвать понижение уровня у верхней головы шлюза № 12 до отметки 60,05 м.

Полезная емкость Палакоргского бьефа может использоваться только для суточного регулирования стока, поэтому при малом боковом притоке базовый расход Ондской ГЭС должен назначаться в пределах 80 м<sup>3</sup>/с.

#### **1.6 Маткожненское водохранилище**

В навигационный период уровни воды в водохранилище должны поддерживаться на отметках: максимальный – 47,20 м и минимальный – 46,80 м.

Суточная амплитуда колебаний уровня воды в Маткожненском водохранилище допускается:

- летом 0,40 м, в пределах уровней 46,80-47,20 м;
- зимой 0,40 м, в пределах уровней 46,80-47,20 м; (отметка забральной балки 46,73).

При использовании полезных емкостей Маткожненского водохранилища в указанных пределах уровней и Выгостровского – в пределах уровней с отметками от 25,80 и до 26,20 м, обеспечивается участие установленных мощностей Палакоргской и Маткожненской ГЭС в пиковой части графика электрической нагрузки.

По условиям нормальной работы водозабора насосной станции г. Беломорска и с целью охраны рыбных запасов р. Н. Выг, попуски воды из Маткожненского водохранилища (базовое значение) должны быть не менее 100 м<sup>3</sup>/с.

### **1.7 Выгостровское водохранилище**

Навигационные уровни в Выгостровском водохранилище:

- максимальный – 26,20 м;
- минимальный – 26,00 м.

Для предотвращения возможного затопления и подтопления островной части города Беломорска в нижнем бьефе Беломорской ГЭС (с момента начала осеннего ледохода до полной очистки русла ниже Беломорской ГЭС ото льда), последняя должна работать равномерно.

Сброс битого льда в нижний бьеф Беломорской ГЭС в осенне-зимний период, по возможности, не производится.

Режим работы в шугоопасный период планируется и ведется в соответствии с действующими инструкциями филиала «Карельский» и с учетом прогнозов ГУ «Карельский ЦГМС».

## **2. Об упущенной выгоде по ГЭС Выгского каскада в 2019 и 2020 году**

### **2.1 Анализ необходимых исходных данных и режимных ограничений ГЭС**

Низкая водность зимнего периода и незначительные запасы гидроресурсов на водохранилищах Карелии на начало 2019 года, обусловленные отсутствием дождевых паводков в осенний период 2018 года, явились причиной существенного невыполнения (на 13 %) плановых показателей по выработке электроэнергии в 1-м квартале.

Приток воды в водохранилища за апрель превысил среднемноголетние значения, но в целом объем весеннего половодья оказался близким к среднемноголетнему. В летний период в Карелии наблюдалась низкая водность, обусловленная дефицитом осадков. Приток воды в водохранилища Карелии составлял 60-80 % обеспеченности, а в сентябре водность понизилась практически до наименьших значений и составила 80-98 % обеспеченности, что соответствует крайне низкой межени. Горизонты воды водохранилищ также снижались и на большинстве из них достигли отметок, которые оказались ниже средних многолетних величин и ниже отметок воды прошлого года. По указанным причинам плановые показатели по выработке электроэнергии за 3-й квартал не были выполнены, невыполнение плана составило порядка 10 %. Дождевые паводки, начавшиеся с середины октября, и отсутствие зимних условий на водных объектах Карелии позволили существенно увеличить выработку электроэнергии в ноябре и декабре, а также привели к пополнению запасов гидроресурсов. Объем выработки электроэнергии в 4-ом квартале превысил плановые показатели почти на 11 %. Требования Системного оператора о режимах работы ГЭС Выгского каскада обусловлены требованиями «Методических указаний по устойчивости энергосистем», которые утверждены Приказом Минэнерго России № 630 от 03.08.2018г. и вступили в силу с

01.03.2019г. Для полного контролируемого сечения, состоящего из одного элемента электрической сети или нескольких элементов электрической сети, одновременное отключение которых возможно в результате единичного нормативного возмущения, для значения максимально допустимого перетока активной мощности в контролируемом сечении, определенного в соответствии с требованиями пункта 34 Методических указаний, увеличенного на величину амплитуды нерегулярных колебаний активной мощности в контролируемом сечении, дополнительно должна быть проведена проверка выполнения следующего критерия: переток активной мощности в контролируемом сечении в направлении дефицитной энергосистемы (энергорайона), отделение которой на изолированную работу от Единой энергетической системы России происходит в результате отключения связей контролируемого сечения и установленная мощность электростанций на территории которой превышает 70% от максимального потребления активной мощности, не должен превышать величины 40% от потребления активной мощности в указанной энергосистеме (энергорайоне) после действия устройств (комплексов) ПА на отключение нагрузки потребителей (с учетом их эффективности), пусковым фактором которых является отключение связей контролируемого сечения (автоматика предотвращения нарушения устойчивости, дополнительная автоматическая разгрузка) или скорость снижения частоты (дополнительная автоматическая разгрузка), увеличенной на величину объема управляющих воздействий от указанных устройств (комплексов) ПА:

– В 2019 году водность была ниже средних многолетних величин за исключением

II-го квартала, в котором водность наблюдалась близкая к средним многолетним значениям. Упущенная выгода за 2019 год составила порядка 1,9 млн. руб. и пришлась она на II-й квартал.

– В 2020 году водность была выше средних многолетних значений. Упущенная выгода за год составила бы 25,3 млн. руб. (в случае ввода в работу

ГГ-3 ГЭС-6 из КР в плановые сроки – 21.04.2020г). Упущенная выгода во II-ом квартале 2020 года – порядка 9,5 млн. руб.

– Если арифметически рассчитать среднюю упущенную выгоду во II-ом квартале (период весеннего паводка – ежегодное явление) 2019 и 2020 гг., то можно предположить, что упущенная выгода будет ежегодно составлять в среднем около 5,7 млн. руб. В таблице 2.1 представлены данные по недовыработке по КВГЭС в связи с ограничением СО на загрузку за 2019 год.

Таблица 2.1 – Недовыработка по КВГЭС в связи с ограничением СО на загрузку за 2019 год

Период	Недовыработка Беломорской ГЭС (ГЭС-6), МВт·ч	Недовыработка Выгостровской ГЭС (ГЭС-5), МВт·ч	Суммарная недовыработка, МВт·ч	Упущенная прибыль, млн.руб.
апрель	213,55	339,51	553,05	0,768
май	2 850,04	1 562,40	4 412,44	0,578
июнь	325,57	345,12	670,70	0,526
		Итого:	5 636,19	1,872

В таблице 2.2 представлены данные по недовыработке по КВГЭС в связи с ограничением СО на загрузку за 2020 год.

Таблица 2.2 – Недовыработка по КВГЭС в связи с ограничением СО на загрузку за 2020 год.

Период	Недовыработка Маткожненская ГЭС (ГЭС-3), МВт·ч	Недовыработка Палакоргской ГЭС (ГЭС-7), МВт·ч	Недовыработка Выгостровской ГЭС (ГЭС-5), МВт·ч	Недовыработка Беломорской ГЭС (ГЭС-6), МВт·ч	Суммарная недовыработка, МВт·ч	Упущенная прибыль, млн.руб.
апрель		1531,8		1644,5	3176,3	2,980
май				3161,4	3161,4	2,808
июнь			2445,1	1912,3	4357,3	3,761
июль	508,2			2110,9	2619,2	2,750
август			474,3	2424,5	2898,8	2,875
сентябрь			1338,6	986,7	2325,3	2,281
октябрь		763,2		1153,2	1916,5	1,545
ноябрь	2710,7			3627,9	6338,5	5,564
декабрь				754,8	754,8	0,766
				Итого:	27 548,08	25,330

### 3. Анализ и выбор среди различных решений проблемы ограничений по загрузке ВЛ

Ограничения по загрузке ВЛ 110 кВ Кемь-Беломорск (Л-115) не позволяет сбалансировать нагрузку на станциях, исходя из этого теряется часть вырабатываемой мощности каскада Выгских ГЭС. На рисунке 3 представлена текущая схема соединений воздушных линий Выгского Каскада.

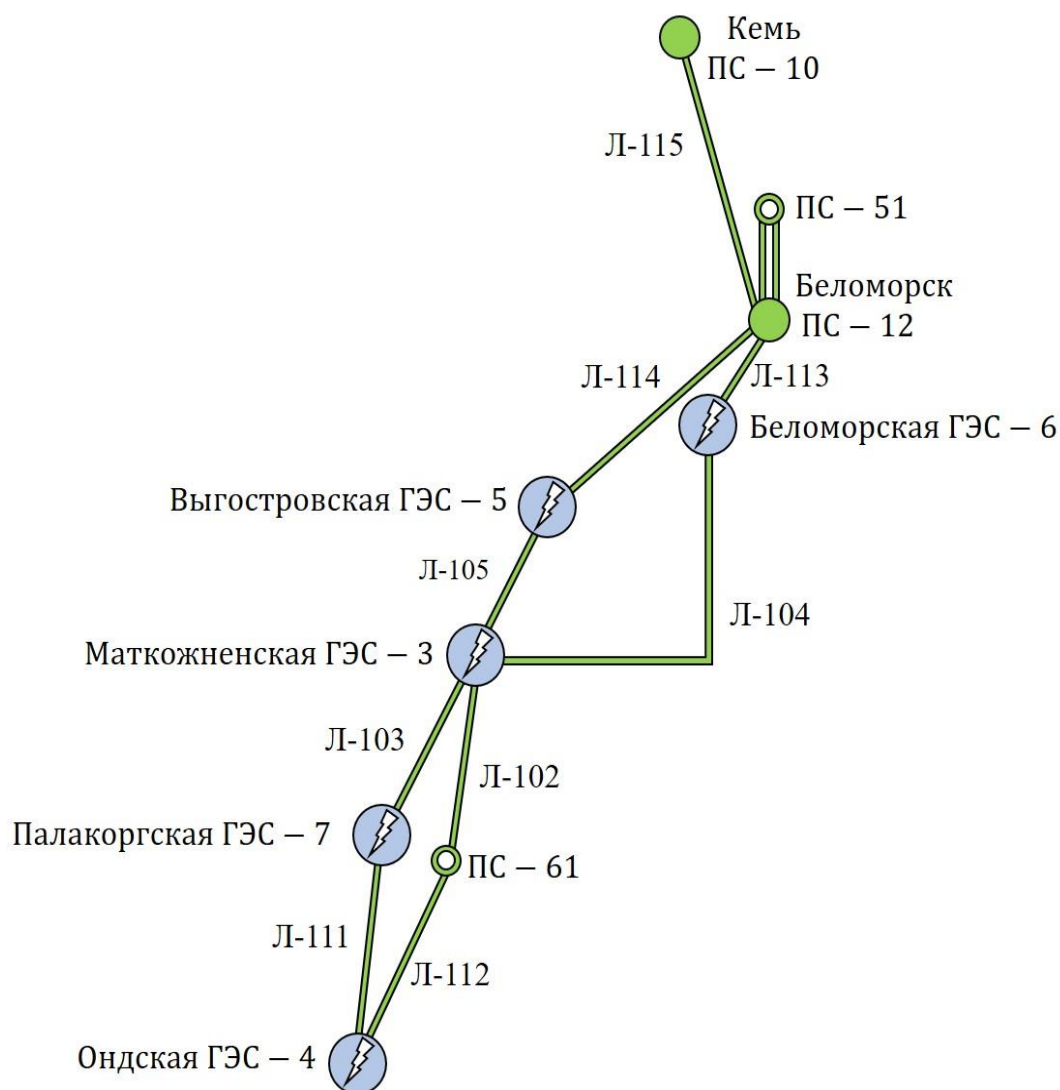


Рисунок 3 – Текущая схема соединений воздушных линий Выгского Каскада



В таблице 3 представлены данные по пропускной способности воздушных линий Выгского Каскада.

Таблица 3 – Пропускная способность воздушных линий Выгского Каскада

<b>Воздушные линии Выгского Каскада</b>	<b>Пропускная способность линий, МВт</b>
110 кВ Кемь-Беломорск (Л-115) –	97-125
ВЛ 110 кВ Беломорская ГЭС- Беломорск (Л-113)	90
ВЛ 110 кВ Выгостровская ГЭС- Беломорск (Л-114)	90

В следующих этапах рассматриваются различные варианты решений по снятию ограничений Выгского Каскада, и оценка адекватности работы моделей посредством сравнения графиков экономической возможности.

### **3.1 Нормальная схема и единичные ремонтные схемы сети ВЛ 110 кВ Маткожненская ГЭС – Идель (Л-102) или ВЛ 110 кВ Маткожненская ГЭС– Палакоргская ГЭС (Л-103) или ВЛ 110 кВ Ондская ГЭС – Палакоргская ГЭС (Л-111) или ВЛ 110 кВ Ондская ГЭС – Идель (Л-112).**

При одновременном отключении Л-111 и Л-112 (протяженность более 50% на одних опорах) вся нагрузка КВГЭС развернется в Л-115 и начнет перегружать сечение при  $\Sigma P_{\text{КВГЭС}} > 130 \text{ МВт}$  (в зависимости от  $T_{\text{нв}}$  и потребления энергорайона КВГЭС). Ограничение будет накладываться на КВГЭС. При одиночном выводе Л-111, Л-112 и Л-102 ограничения те же, что и в нормальной схеме. При одиночном выводе Л-103 ограничение накладывается на КВГЭС без ГЭС-7.

Время существования схем (по статистике за период 11.2019-11.2020) 84,2 % времени (более 307 дней) в году. Существующие ограничения станций- до 57 МВт. Наиболее подходящим решением является - организация технической

возможности запуска управляющих воздействий от устройства АОПО ВЛ 110 кВ Кемь – Беломорск (Л-115) на ПС 110 кВ Беломорск (ПС 12) с контролем направления мощности (существующее устройство) на – ОГ в объёме до 57 МВт (например, за счёт организации каналов передачи (УПАСК) от ПС 110 кВ Беломорск (ПС 12) до Беломорской ГЭС (ГЭС-6) и Выгостровской ГЭС (ГЭС-5)). Это позволит полное исключение ограничений в указанных схемах сети. На рисунке 3.1 представлена схема соединений воздушных линий Выгского Каскада для реализации первого варианта.

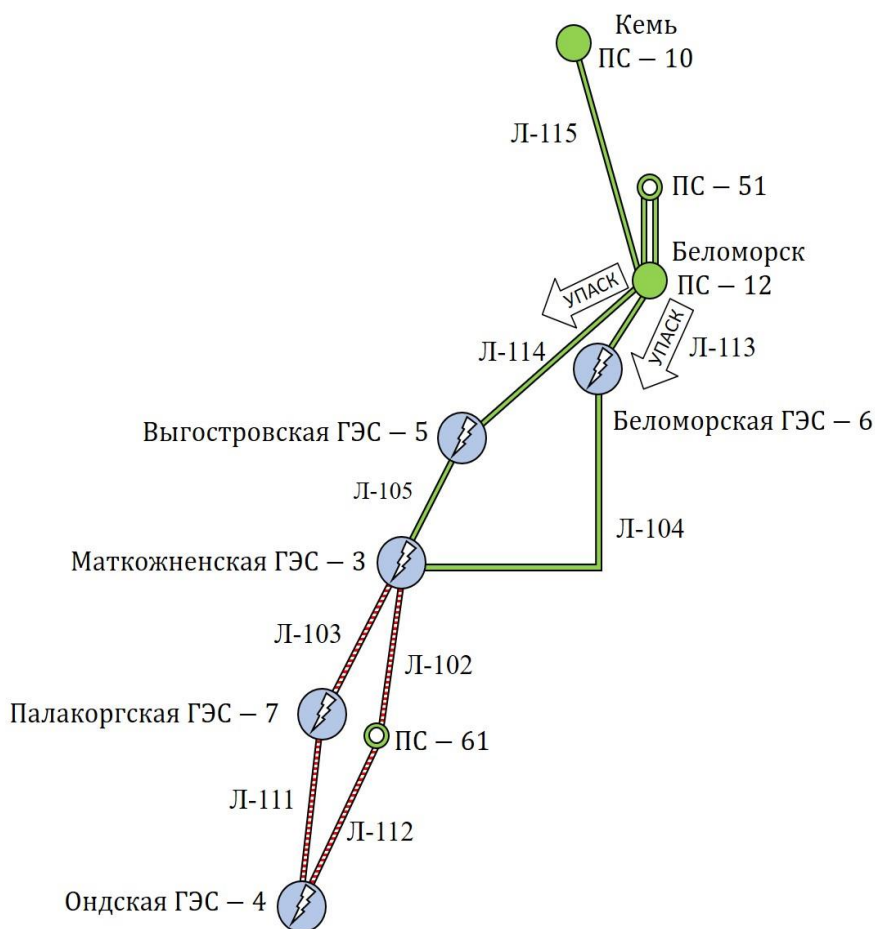


Рисунок 3.1 - Схема соединений воздушных линий Выгского Каскада для реализации первого варианта

**3.2 Двойные ремонтные схемы ВЛ 110 кВ Ондская ГЭС - Палакоргская ГЭС (Л-111) и (или) транзита 110 кВ Ондская ГЭС -Идель-Маткожненская ГЭС и ВЛ110 кВ беломорская ГЭС -Беломорск (Л-113) (ВЛ 110 кВ Маткожненская ГЭС - Беломорская ГЭС (Л-104)) или ВЛ 110 кВ Выгостровская ГЭС - Беломорск (Л-114) (ВЛ110 кВ Маткожненская ГЭС - Выгостровская ГЭС (Л-105)).**

На рисунке 3.2 представлена схема соединений воздушных линий Выгского Каскада для реализации второго варианта.

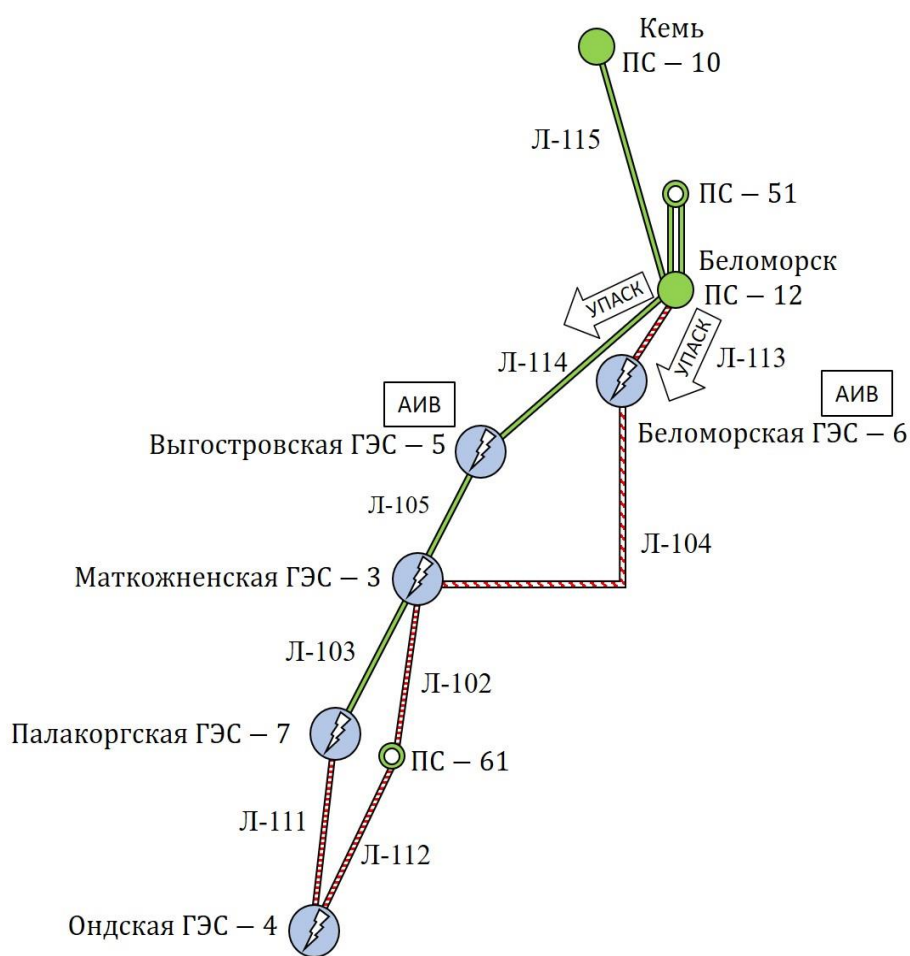


Рисунок 3.2 – Схема соединений воздушных линий Выгского Каскада для реализации второго варианта

При выводе в ремонт: Л-111 и Л-112 (перегруз сечения Л-115); Л-111 и Л-102 (перегруз сечения Л-115); Л-111 и Л-113 (перегруз сечения Л-114 при аварийном отключении Л-102 или Л-112); Л-111 и Л-114 (перегруз сечения Л-113 при аварийном отключении Л-102 или Л-112). Ограничение будет накладываться на КВГЭС.

Время существования схем (по статистике за период 11.2019-11.2020): 8,5 % времени (более 31 дня) в году. Существующее ограничение: 70 МВт. Наиболее подходящим решением является - установка устройств АОПО ВЛ 110 кВ Беломорская ГЭС – Беломорск (Л-113) на Беломорской ГЭС (ГЭС-6) и АОПО ВЛ 110 кВ Выгостровская ГЭС – Беломорск (Л-114) на Выгостровской ГЭС (ГЭС-5) с действием на ОГ указанных станций. Это приводит к снижению величины ограничений в указанных схемах сети на величину до 67 МВт (до величины не более 3 МВт).

**3.3 Нормальная схема и единичные ремонтные схемы сети с отключением ВЛ 110 кВ Маткожненская ГЭС – Идель (Л-102) или ВЛ 110 кВ Маткожненская ГЭС – Палакоргская ГЭС (Л-103) или ВЛ 110 кВ Ондская ГЭС – Палакоргская ГЭС (Л-111) или ВЛ110 кВ Ондская гэс – Идель (Л-112).**

На рисунке 3.3 представлена схема соединений воздушных линий Выгского Каскада для реализации третьего варианта.

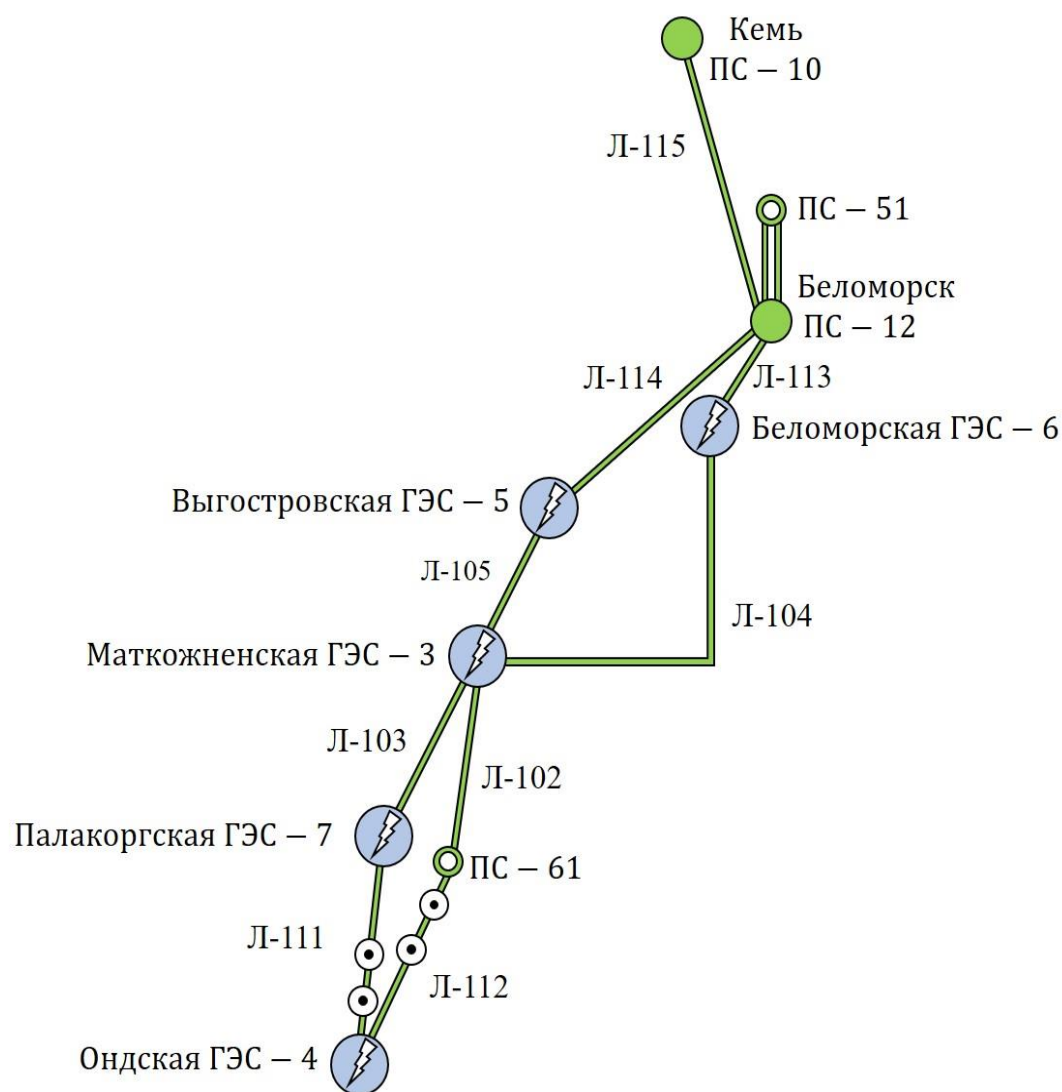


Рисунок 3.3 – Схема соединений воздушных линий Выгского Каскада для реализации третьего варианта

Время существования схем (по статистике за период 11.2019-11.2020) 84,2 % времени (более 307 дней) в году. Существующие ограничения станций- до 57 МВт. Реконструкция ВЛ 110 кВ Ондская ГЭС – Палакоргская ГЭС (Л-111) и ВЛ 110 кВ Ондская ГЭС – Идель (Л-112) с сооружением дополнительных опор на участке не менее 50% длины более короткой линии (не менее 13 км) в целях ликвидации общей подвески.

### 3.4 Анализ выбора наиболее оптимального варианта реализации

Применение устройств противоаварийной автоматики, в том числе устройств автоматического ограничения перегрузки оборудования (АОПО), позволяет увеличить величину передаваемой мощности в сечении без строительства дополнительных линий электропередачи или установки дополнительного оборудования. В существующих устройствах АОПО используется сезонный принцип изменения уставок, когда уставки изменяются эксплуатирующим персоналом два раза в год (при переходе на зимние или летние уставки), или автоматический принцип изменения уставок при изменении температуры окружающего воздуха. Сезонный принцип изменения уставок устройств АОПО имеет недостатки, которые при определенных условиях могут привести к перегрузке линий электропередачи или оборудования, недоиспользованию пропускной способности линий электропередачи или оборудования, что, в свою очередь, может привести к реализации излишних управляющих воздействий устройств АОПО. В следствие этого проекты 1 и 2 являются более экономически выгодными и сроки окупаемости в разы меньше.

Анализируя полученные результаты моделирования, можно сделать была составлена таблица 3.4 технико-экономических показателей.

Таблица 3.4 – Сводная таблица технико-экономических показателей

Мероприятие	Существующие ограничения, МВт	Прогнозируемые ограничения, МВт	Прогнозируемые затраты, млн. руб	Срок окупаемости
1	57	0	20	9 месяцев
2	70	3	20	9 месяцев
3	57	45	45	20 месяцев

### 3.5 Выбор оборудования для реализации проекта

По мере развития электроэнергетических систем наряду с известными преимуществами объединения ЭЭС на параллельную работу проявляются и качественно новые негативные особенности их функционирования, определяемые взаимосвязанностью и взаимозависимостью разнообразных объектов ЭЭС через технологию, режимы и управление, усилением взаимного влияния режимов отдельных частей системы, усложнением характера переходных процессов при возмущениях.

В итоге возрастает опасность каскадного развития аварий, наиболее тяжелые из которых могут сопровождаться существенными неблагоприятными последствиями для потребителей электроэнергии и расстройством функционирования народного хозяйства в целом.

Традиционно в российской электроэнергетике для построения каналов РЗА используются высокочастотные тракты по линиям электропередачи ЛЭП систем противоаварийной автоматики (ПА) – каналы передачи аварийных сигналов и команд. Обусловлено это не только историей развития техники, но и тем, что сами ЛЭП – объекты защиты, а организованные по ним ВЧ каналы напрямую связывают защищаемые объекты энергосистем.

С развитием в электроэнергетике инфраструктуры волоконно-оптических кабелей и цифровых систем передачи информации появились аналоги работающих по ВЧ каналам систем РЗА как сами защиты, так и каналобразующее оборудование цифровые устройства передачи аварийных сигналов и команд (УПАСК). Однако использование ВОК только для цифровых устройств и систем РЗА на средних и больших расстояниях оказывается экономически неэффективными. Далеко не всегда существующие системы РЗА, использующие только ЦСПИ, могут достигнуть технической и экономической эффективности систем, использующих ВЧ каналы.

Тем не менее использование цифровых каналов связи позволяет осуществлять передачу сигналов защит и команд РЗ и ПА одновременно, причем

со значительным, по сравнению с ВЧ каналами, уменьшением времени передачи команд – до 10 мс.

Также ВОЛС обладает большим количеством преимуществ при передаче команд и сигналов на средние дистанции:

- высокая ширина диапазона передачи;
- небольшое значение затухания в широкой полосе частот;
- большие участки регенерации; -защищённость от внешних электромагнитных полей;
- малая металлоёмкость линий передачи и отсутствие дефицита цветных металлов кабеля;
- отсутствие излучения радиации в окружающую среду;
- малые габариты и масса.

Поэтому остановим свой выбор на волокну-оптическом средстве передачи команд.

Для передачи команд РЗ и ПА по цифровым каналам связи используется специальное исполнение устройства АВАНТ К400. АВАНТ К400 может передавать и принимать по 32 команды, имеет два слота для организации двух независимых каналов передачи/приема. Данное устройство позволяет реализовывать различные схемы соединений для дуплексной передачи команд РЗ и ПА по выделенной ВОЛС, такие как «точка-точка», «точка-точка» с резервированием «двунаправленное кольцо» а также симплексный канал «точка-многоточка» с резервированием.

По принципу действия устройство представляет собой программируемый логический контроллер, ядром которого является блок центрального процессора. Основным назначением блока центрального процессора является:

- обеспечение взаимодействия между всеми функциональными блоками, входящими в состав устройства;
- выполнение процедур самодиагностики для проверки работоспособности составных частей устройства и программного обеспечения;



- прием и обработка информации, поступающей от блоков аналоговых входов тока и напряжения, блоков дискретных входов и выходных реле, блока связи с АСУ и элементов интерфейса человек-машина;

- преобразование и обработка полученной информации по заранее заданным алгоритмам;

- вывод результатов обработки полученной информации на выходные реле, сенсорный дисплей, светодиоды, динамик, а также передача информации в АСУ.

Автоматика ограничения перегрузки оборудования (АОПО) предназначена для предотвращения недопустимой по величине и длительности токовой нагрузки электрооборудования и ЛЭП.

Принцип действия АОПО основан на измерении тока контролируемого присоединения и сравнении его с заданным допустимым значением нагрузки, с учетом или без учета направления мощности, передаваемой по контролируемому присоединению. АОПО действует на сигнализацию, а также реализует управляющие воздействия, направленные на разгрузку перегруженных элементов электрической сети:

- автоматическую загрузку генераторов и отключение нагрузки в дефицитной части энергосистемы;

- делительную разгрузку турбин энергоблоков и отключение генераторов в избыточной части энергосистемы;

- деление энергосистемы для перераспределения потоков мощности и ликвидацию перегрузки элемента сети;

- отключение с запретом АПВ перегруженного элемента сети.

При действии АОПО на отключение нагрузки может быть использовано автоматическое включение потребителей (АВП) после АОПО. Для работы АВП в АОПО предусмотрены органы пуска и останова АВП.

В устройстве может быть выполнено до 4-х АОПО (1 АОПО – 4 АОПО), для каждой из которых предусмотрено АВП (1АВП – 4АВП).

Каждая АОПО содержит следующие элементы:

- 1 ступень. Имеет отдельную уставку по току, при превышении которой действует с выдержкой времени на сигнализацию перегрузки. Выполняется ненаправленной. Логическая схема 1 ступени АОПО представлена на рисунке 1.2;

- 2 и 3 ступени идентичны. Каждая ступень имеет отдельную уставку по току и пять отдельных выдержек времени. Действует на реализацию различных управляющих воздействий, необходимых для снижения нагрузки контролируемых присоединений. Использование контроля направления мощности определяется режимом работы АОПО.

Предусмотрена возможность действовать на отключение нагрузки на удаленных энергетических объектах через устройства САОН. Логическая схема 2(3) ступени АОПО представлена на рисунке 1.3;

- 4 ступень. Имеет отдельную уставку по току, при превышении которой действует с выдержкой времени на отключение перегруженного элемента сети. Использование контроля направления мощности определяется режимом работы АОПО.

Алгоритм разрешения АВП. Имеет отдельную уставку по току, при снижении тока ниже которой разрешает включение потребителей, ранее отключенных действием АОПО.

Каждая АОПО может одновременно контролировать нагрузку 4-х присоединений, при этом на каждом присоединении контролируется ток одной фазы, так как режим перегрузки является симметричным. Кроме того, для каждого присоединения возможен контроль направления мощности. В рисунке 4.1 представлена логическая схема алгоритма.

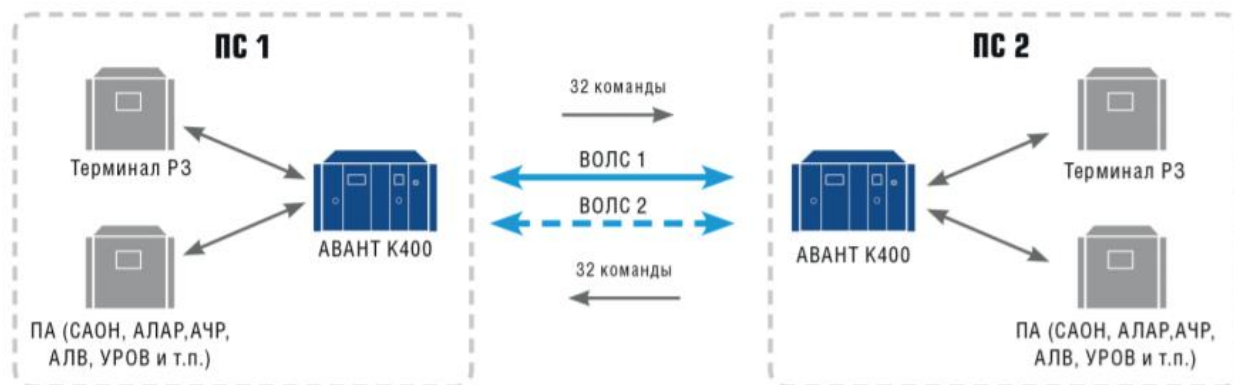


Рисунок 3.5 – Логическая схема алгоритма

#### 4. Надежность обеспечения генерирующей мощностью

При решении задач анализа и синтеза надежности при управлении развитием и эксплуатацией электроэнергетических систем необходимо учитывать отказы, приводящие к нарушению электроснабжения и недоотпуску электроэнергии потребителям и обусловленные следующими причинами:

- дефицитом электроэнергии из-за недостатка энергоресурсов, например, вследствие серии маловодных лет или холодных зим, приведших к срабатыванию многолетних запасов, требующим лимитирования потребления электроэнергии;
- дефицитом мощности в Единой ЭЭС (ЕЭЭС) страны или в ее отдельной объединенной ЭЭС (ОЭЭС) из-за аварийного простоя генерирующих агрегатов или превышения потребления над прогнозом нагрузки при ограниченной пропускной способности связей между ОЭЭС, не вызывающим нарушения устойчивости параллельной работы ОЭЭС, но либо требующим ограничения электропотребления по указанию диспетчерских управлений, либо приводящим к снижению частоты, что также сопровождается уменьшением потребления электроэнергии;
- автоматическим отключением потребителей для предотвращения нарушения устойчивости по основной сети ОЭЭС или межсистемным связям

ЕЭЭС, т. е. для предотвращения развития аварии при коротких замыканиях на линиях, аварийных отключениях мощных блоков и т. д.;

- автоматическим отключением потребителей при снижении частоты в аварийно-отделившихся дефицитных частях системы;

- прекращением электроснабжения потребителей или недопустимым снижением напряжения при аварийных отключениях линий распределительной сети, а также при их плановых ремонтах в нерезервированных сетях;

- кратковременными перерывами (обусловленными действием защит и автоматики) или глубокими снижениями напряжения при авариях в распределительной сети, а также в основной сети, если от нее непосредственно осуществляется электроснабжение потребителей, приводящими к нарушению работы электроприемников.

Эти причины отказов ЭЭС и должны учитываться соответствующими методами расчета надежности. Анализ причин отказов позволяет выделить три составляющие надежности, обеспечивающие удовлетворение спроса потребителей на электроэнергию, а именно:

- обеспеченность энергоресурсами (запасами);
- обеспеченность мощностью (производительностью);
- обеспеченность электрическими сетями — основными системообразующими и распределительными как общего назначения, так и специализированными (системы электроснабжения промпредприятий, городов и сельскохозяйственного назначения).

Такое деление положено в основу декомпозиции задач расчетной оценки надежности ЭЭС, рассматриваемых в последующих разделах справочника.

Задачи надежности решаются как при управлении развитием, так и при управлении функционированием ЭЭС для временных уровней, принятых в соответствующих автоматизированных системах проектирования и диспетчерского управления.

## 4.1 Оценка надежности обеспечения генерирующей мощностью

Рассмотрение методов расчета математического ожидания недоотпуска электроэнергии и ущерба вследствие дефицита мощности в системе с учетом всех. Математическое ожидание недоотпуска электроэнергии определим, учитывая лишь вынужденные простои агрегатов и изменение нагрузки в соответствии с суточным графиком.

Выберем расчетную ступень мощности  $P_0$ , равную или в целое число раз меньшую единичной мощности агрегатов. Суточный график нагрузки перестроим таким образом, чтобы все его ступени были кратны выбранной расчетной ступени мощности. Очевидно, малое значение расчетной ступени мощности позволит более точно отразить в расчете график нагрузки, но повлечет за собой увеличение объема расчета. На рисунке 4.1 представлен Суточный график нагрузки Карельского РДУ.

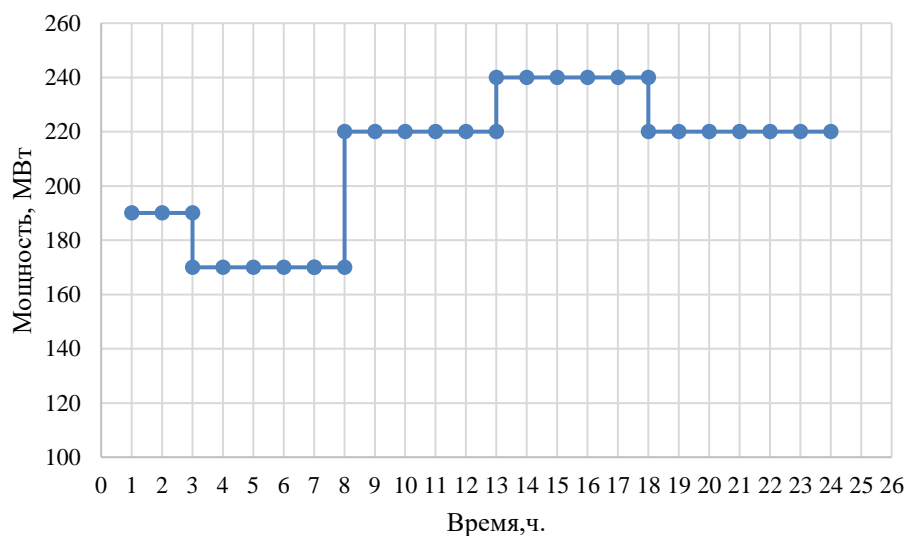


Рисунок 4.1 – Суточный график нагрузки Карельского РДУ

Пользуясь биномиальным законом распределения, по известному коэффициенту вынужденного простоя агрегата рассчитаем ряд распределения коэффициентов мощностей генераторов, находящихся в рабочем состоянии  $K_r^{iP_0}$ , где индекс  $iP_0$ , соответствует мощности в  $i$  расчетных ступеней. Из пункта

2 следует, что имеется недоотпуск в энергосистему при выбранном варианте модернизации 57 МВт. При этой ступени мощности, воспользовавшись данными по коэффициентам рабочего состояния агрегатов составим ряд распределения коэффициентов мощностей. В таблице 4.1 представлено распределение коэффициентов мощностей.

Таблица 4.1– Распределения коэффициентов мощностей

i	8	6	5
$K_{\Gamma}^{iP_0}$ ,	0,849	0,142	0,009

Нагрузку также представим в виде ряда коэффициентов  $K_H^{iP_0}$ , характеризующих относительную длительность потребления мощности  $jP_0$ , и вычисляемых по формуле:

$$K_H^{iP_0} = \frac{t(jP_0)}{24}. \quad (4.1)$$

Подсчитав коэффициенты нагрузки по формуле. В результате получим ряд мощностей нагрузки. В таблице 4.2 представлено распределение коэффициентов мощностей.

Таблица 4.2- Распределения коэффициентов мощностей нагрузки

j	7	6	5	3
t (jP <sub>0</sub> )	3	2	11	8
$K_H$	0,125	0,084	0,458	0,333

Коэффициенты различных дефицитов мощности вычисляем по формуле:

$$K_d^{1P_0} = K_H^{7P_0} \cdot K_{\Gamma}^{6P_0} + K_H^{5P_0} \cdot K_{\Gamma}^{4P_0} = 0,0218; \quad (4.2)$$

$$K_{д}^{2P0} = K_{н}^{6P0} \cdot K_{г}^{4P0} = 0,0008; \quad (4.3)$$

$$K_{д}^{3P0} = K_{н}^{7P0} \cdot K_{г}^{4P0} = 0,0011. \quad (4.4)$$

Результаты расчета можно представить в виде ряда коэффициентов дефицита мощности. В таблице 4.3 представлены коэффициенты дефицита мощности.

Таблица 4.3- Коэффициентов дефицита мощности

k	1	2	3
$K_{д}^{kP0}$	0,0218	0,0008	0,0011

Математическое ожидание недоотпуска электроэнергии тогда:

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{E} &= 8760 \cdot P_0 \cdot \sum k K^{iP0} = 8760 \cdot P_0 \cdot (1K_{д}^{P0} + 2K_{д}^{2P0} + 3K_{д}^{3P0}) = \\ &= 1210 \text{ МВт} \cdot \text{ч}. \end{aligned} \quad (4.5)$$

## 4.2 Экономический эффект от установки оборудования

Найдём выручку от реализации электроэнергии благодаря уменьшению холостых водосбросов. В качестве примера рассмотрим 26.03.2020

На сайте Администратора торговой системы электроэнергии возьмем индексы цен на продажу электроэнергии в ОЭС Северо-Запада. При расчетах будем использовать индексы за 26.03.2020, также не будем учитывать потери в ЛЭП.

Выручку от реализации электроэнергии можно найти по формуле:

$$B = Q \cdot P, \quad (4.6)$$

где Q – количество данного вида продукции;

P – Цена конкретного вида продукции.

Например, для ГЭС-5 за 9-й час 26.03.2020 выручка составит 49103 рублей.

В приложение А представлены сравнительные экономические результаты работы Каскада Выгских ГЭС после установки оборудования и без установки оборудования за 26.03.2020.

Таким образом, за одни сутки в ноябре 2019 года выручка после модернизации оказалась больше 420 тыс. рублей. Если принять что индексы цен на продажу электроэнергии в течении всех суток октября 2018 года не изменялись, то суммарная месячная выручка при суточном регулировании будет на 1516 тыс. руб. выше чем до модернизации за аналогичный период. Если не учитывать изменение индекса цен и в других месяцах первого водохозяйственного года, а расчет проводить для индекса цен за 26.03.2020. то получим дополнительную выручку от реализованной электроэнергии с 2019 года 2020 года в размере 25,7 млн. руб. Сравнительная гистограмма годовой выручки за четыре водохозяйственных года при суточном и без суточного регулирования представлена на рисунке 4.2 сравнительный анализ полученной выручки каскада.

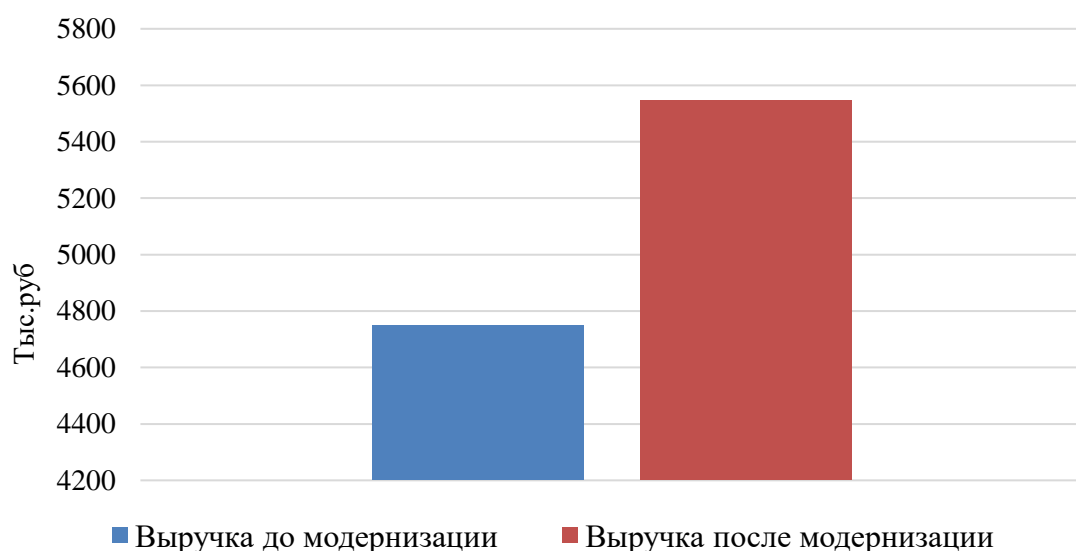


Рисунок 4.2 – Сравнительный анализ полученной выручки каскада



На рисунке 4.3 представлен сравнительный анализ увеличения мощности каскада.

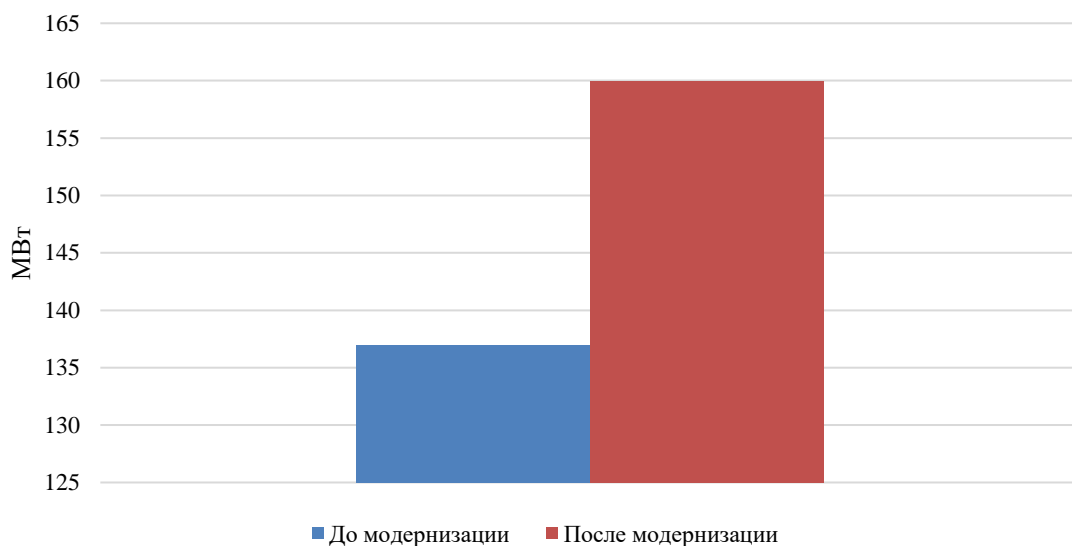


Рисунок 4.3 – Сравнительный анализ увеличения мощности Выгского каскада

В различные месяцы величина дополнительной выручки колеблется в пределах  $0 + 5,11\%$ . Нулю процентов соответствуют месяцы в которых станции каскада работают при максимальной мощности и средняя за сутки мощность равна часовой. Максимальной разнице выручки соответствуют месяцы в которых на суточном графике нагрузки наибольшая разница в мощности между ночным минимумом и дневным максимумом нагрузки.

## 5. Анализ статической устойчивости

Статическая устойчивость – это способность системы восстанавливать исходный (или близкий к исходному) режим после малого его возмущения.

Предел статической устойчивости представляет собой максимальную мощность, которую можно передавать в установившихся режимах без потери

синхронизма. На величину предела статической устойчивости влияет не только сопротивление линий (пропорциональное расстоянию), но и напряжение линий передачи и сопротивления генераторов, трансформаторов и других элементов системы.

Определение предельного перетока активной мощности по статической устойчивости определяется путём утяжеления исходного установившегося режима. При утяжелении режима производится расчет серии установившихся режимов при изменении параметров в соответствии с заданной траекторией утяжеления. Критерием нахождения предельного режима является сходимость расчета режима. Дополнительным критерием нахождения предельного режима может служить достижение экстремума (максимума или минимума) по отмеченным контролируемым величинам (мощности по сечениям, потерям, напряжениями и т.д.).

Запас статической устойчивости нормального установившегося режима определяется по сечению, опасному с точки зрения нарушения статической устойчивости в послеаварийном режиме. Таким сечением является совокупность электрических связей, например, воздушных линий электропередачи (ВЛ) связывающих две энергосистемы, энергорайона, электростанции и т.д., по которым возможно нарушение статической устойчивости из-за их перегрузки в послеаварийном режиме. Такая перегрузка, в свою очередь, может быть вызвана, аварийным отключением одной из ВЛ входящих в контролируемое сечение, отключением генерации в приемной части энергосистемы и т.д. Для выявления опасного сечения необходимо проанализировать потокораспределение в нормальном режиме работы ЭЭС, сравнить схему нормального режима со схемой после аварийного режима, выяснить, на какие оставшиеся в работе связи произойдет наброс мощности после аварийного отключения одного из элементов электрической сети входящих в контролируемое сечение.

В работе ВКР оценка аperiodической статической устойчивости, осуществляется по критерию сходимости итерационного процесса при расчете установившегося режима ЭЭС.

В практических расчетах статической устойчивости ЭЭС для нахождения предела статической устойчивости используется метод последовательного утяжеления режима, суть которого заключается в последовательном увеличении загрузки контролируемого сечения до того момента, когда итерационный процесс перестает сходиться (электрический режим не считается). Это достигается, либо посредством проведения расчета нескольких последовательно утяжеленных установившихся режимов с принятым шагом утяжеления, либо посредством использования специальной функции программного комплекса «Утяжеление», которая позволяет после задания соответствующих исходных данных сформировать траекторию утяжеления и определить предел передаваемой мощности. При этом, величина перетока мощности по связи, при котором режим еще считается и является предельным по условию обеспечения статической устойчивости.

Определенное методом утяжеления значение предела передаваемой мощности по связи в нормальном режиме  $P_{пр}^H$ , используется в дальнейшем для расчета коэффициента запаса статической устойчивости.

Для расчета коэффициента запаса статической устойчивости нормального режима помимо определенного значения  $P_{пр}$  и используется значение перетока мощности по контролируемому сечению в нормальном режиме (до утяжеления)  $P_H$ , а если контролируемое сечение представляет собой относительно слабую связь, то и величина нерегулируемых колебаний потока мощности  $\Delta P$ :

$$K_3^H = \frac{P_{пр}^H - P_H}{P_H} \cdot 100\%. \quad (4.7)$$

Определенный коэффициент запаса статической устойчивости нормального режима сравнивается с нормированным значением, которое регламентируется Методическими указаниями по расчету устойчивости энергосистем, и для нормальных режимов должно быть не менее 0,2. Если  $k_3$

оказывается меньше нормированного значения, то делаются рекомендации его увеличению.

Расчет режима произведём с помощью программного комплекса Rastr Win. Он предназначен для расчета, анализа и оптимизации режимов электрических сетей и систем. Рабочая область Rastr Win представляет собой табличный процессор, поддерживающий возможность ввода группового или одиночного редактирования данных, сортировку, а также графические средства анализа результатов расчета.

Исходными данными для расчетов режимов в программном комплексе RastrWin являются: топология схемы (направленный граф); параметры ветвей и трансформаторов схемы замещения; мощности в узлах нагрузок; номинальное напряжение источника энергии; коэффициенты трансформации. Программный продукт выполняет расчет режима методом Ньютона в форме небаланса мощностей. Идея метода Ньютона состоит в последовательной замене на каждой итерации системы нелинейных уравнений некоторой линейной системой, решение которой дает значения неизвестных, более близкие к решению нелинейной системы, чем исходное приближение. Для линеаризации нелинейных уравнений их раскладывают в ряд Тейлора.

На каждой итерации  $k$  метода Ньютона выполняют несколько шагов, вычисляется вектор балансов токов  $W$ .

$$w_i(U) = \frac{S_i}{U_i} - Y_{ij}U_i - \sum_{j=i}^{n+1} Y_{ij}U_j, \quad (4.8)$$

где  $i$  и  $j$  – номера узлов;

$S_i$  – нагрузка  $i$ -го узла;

$U_i$  – напряжение  $i$ -го узла;

$Y_{ij}$  – собственная проводимость  $i$ -го узла;

$Y_{ij}$  – взаимная проводимость узлов  $i$  и  $j$ ;

$n$  – количество узлов.

Если достигнута заданная точность сведения баланса, то итерации завершаются. Вычисляются элементы матрицы Якоби:

$$\begin{bmatrix} \frac{dW}{dU} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dw_1}{dU_1} & \dots & \frac{dw_1}{dU_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dw_n}{dU_1} & \dots & \frac{dw_n}{dU_n} \end{bmatrix}. \quad (4.9)$$

Решается система уравнений методом Гаусса и определяется вектор поправок  $\Delta U$ .

$$\begin{bmatrix} \frac{dW}{dU} \end{bmatrix} \Delta U = -W[U^{(k)}]. \quad (4.10)$$

Определяются напряжения узлов по выражению:

$$U^{(k+1)} = U^{(k)} + \Delta U. \quad (4.11)$$

На рисунке 5.1 задаем траекторию утяжеления в таблицах.

	S	Тип	N_узла	dP_наг	dQ_наг	Tg	dP_ген	dQ_ген
1		Обычный	1			<input checked="" type="checkbox"/>	10	
2		Обычный	3			<input checked="" type="checkbox"/>	10	
3		Обычный	4			<input checked="" type="checkbox"/>	10	
4		Обычный	12			<input checked="" type="checkbox"/>	10	
5		Обычный	13			<input checked="" type="checkbox"/>	10	
6		Обычный	21			<input checked="" type="checkbox"/>	10	
7		Обычный	6	10		<input checked="" type="checkbox"/>		
8		Обычный	7	10		<input checked="" type="checkbox"/>		
9		Обычный	9	10		<input checked="" type="checkbox"/>		
10		Обычный	10	10		<input checked="" type="checkbox"/>		
11		Обычный	15	10		<input checked="" type="checkbox"/>		
12		Обычный	16	10		<input checked="" type="checkbox"/>		
13		Обычный	18	10		<input checked="" type="checkbox"/>		
14		Обычный	19	10		<input checked="" type="checkbox"/>		

Рисунок 5.1 – Траектория утяжеления в ПВК RastrWin3.

Необходимо задать шаг утяжеления по узлам 10 МВт. На рисунке 5.2 график энергосистемы в послеаварийном режиме.

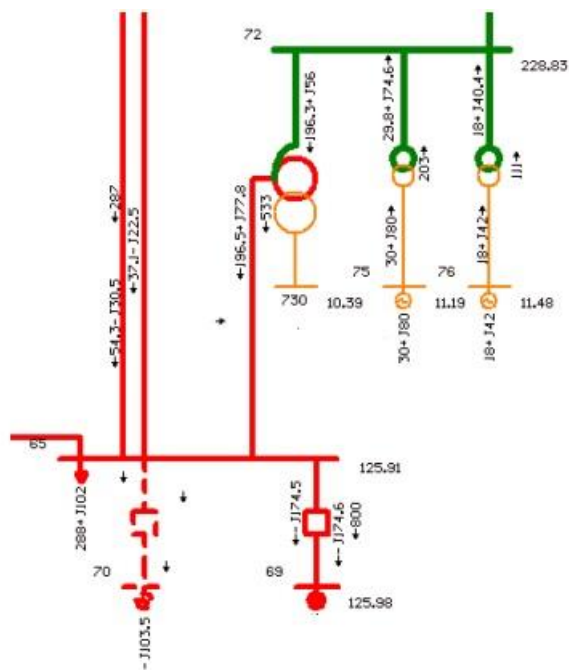


Рисунок 5.2 – График энергосистемы в послеаварийном режиме

Значения мощностей при утяжелении энергосистемы до предельного значения по мощности. На рисунке 5.3 значение мощности при утяжелении энергосистемы до предельного значения по мощности.

P <sub>ij</sub>	P <sub>ij</sub>	P <sub>ij</sub>	P <sub>ij</sub>
26-34-2	26-48-0	26-31-0	30-34-0
92.710	172.361	85.394	-101.749
94.907	181.576	87.643	-105.691
96.162	186.742	89.362	-107.849
96.616	188.571	90.360	-108.546
96.766	189.155	90.745	-108.763
96.867	189.536	91.030	-108.901
96.937	189.794	91.245	-108.993
97.011	190.058	91.495	-109.084

Рисунок 5.3 – Значения мощностей при утяжелении энергосистемы до предельного значения по мощности

Вычисляем значение коэффициента запаса статической устойчивости.

$$K_3^H = \frac{P_{пр}^H - P_H}{P_H} \cdot 100\% = \frac{190,058 - 172,361}{172,361} \cdot 100\% = 10,3\%. \quad (4.12)$$

Методическими указаниями по расчету устойчивости энергосистем, и для нормальных режимов должно быть не менее 0,2.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной диссертационной работе рассмотрены несколько вариантов по снижению ограничений Системного оператора. Выбрано математическое моделирование различных режимов работы гидроэлектростанций.

В результате исследования было установлено, что для Каскада Выгских ГЭС, наиболее перспективным и экономичным вариантом является применение АОПО. Помимо всего, обязательным условием является ВОЛС для обеспечения большей надежности в аварийных ситуациях. Так же помимо всего в результате проведенных в диссертационной работе исследований, направленных на определение оценки обеспечения надежности генерации, установлено, что математическое ожидание недоотпуска электроэнергии составляет 1210 МВт · ч.

Кроме того, был проведен анализ экономической эффективности проекта, в результате которого было установлено, что проект является рентабельным с сроком окупаемости 9 месяцев. Так же проведены расчеты статической устойчивости после аварийного утяжеленного режима, и значение коэффициента запаса статической устойчивости составляет 10,3 %, Методическими указаниями по расчету устойчивости энергосистем, в методических указаниях по расчету устойчивости энергосистем и для нормальных режимов должно быть не менее 0,2.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 29.11.2016 № 1256 «Об утверждении Методических указаний по расчету уровня надежности и качества поставляемых товаров и оказываемых услуг для организации по управлению единой национальной (общероссийской) электрической сетью и территориальных сетевых организаций»
2. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ.01.01.1999- Москва: ОАО «СО ЕС», 2017 -57с.
3. Ю.А. Секретарев. Учебное пособие для студентов очного и заочного отделений факультета энергетики по направлению «Электроэнергетика» (специализация «Электроснабжение») надежность электроснабжения — Новосибирск, 2010 г.
4. Денисов, Иван Павлович. Основы использования водной энергии- Москва: Энергия 2021. – № 1-364 с.
5. Правила использования каскада водохранилищ на реке Выг- 2018 , 216 с.
6. Куприна К.А. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕКОНСТРУКЦИИ ОТКРЫТОГО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА 220 КВ НА ПРИМЕРЕ УГЛИЧСКОЙ ГЭС: статья в сборнике трудов конференции ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В XXI ВЕКЕ – Саяногорск, 2018 – 155-162
7. СТО 59012820.29.020.002-2018. Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Устройства автоматики ограничения перегрузки оборудования. Нормы и требования Стандартиформ, 2018 – 5с.
8. Ю.А. Секретарев. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ -2021 г. – 15 с.

9. Андреев Д.А. Совершенствование методов расчета эксплуатационной надежности электрооборудования электростанций и подстанций- Иваново, 2006.

10. ДЬЯЧКОВ В.А., АХТЯМОВ П.А., ФЕДОРОВ Ю.Г.- НАДЕЖНОСТЬ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ - ТЕРМИНОЛОГИЯ, ПОКАЗАТЕЛИ, ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ- МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ БОЛЬШИХ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ, Страницы: 29-39,2016 год.

11. СКОРОБОГАТОВ А.А.- ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ, Иваново- 2016 год.

12. Р.Р. Саттаров, Р.Р. Гарафутдинов- Моделирование усовершенствованной автоматики ограничения перегрузки оборудования, Уфа- 2017 год.

13. СТО 59012820.29.240.001-2011. Стандарт организации «Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Условия организации процесса. Условия создания объекта. Нормы и требования». Москва : Стандартинформ, 2011 – 4 с.

14. А.О. Сулайманов, М.В. Андреев, Н.Ю. Рубан. Концепция адекватного моделирования релейной защиты и противоаварийной автоматики энергосистем А.О. Сулайманов, М.В. Андреев, Н.Ю. Рубан Электричество. – 2012. – № 6. – С. 17–20

15. Фишов, А.Г. Реконфигурация электрических сетей с распределенной генерацией и мультиагентным управлением / А.Г. Фишов, Б.Б. Мукатов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. –Т. 326, № 9. – С. 143–152.

16. Схема и программа перспективного развития электроэнергетики Республики Карелия на 2019–2023 годы

17. Воропай, Н.И. Комплекс интеллектуальных средств для предотвращения крупных аварий в электроэнергетических системах / Н.И. Воропай. –Новосибирск: Наука, 2016. – 332 с

18. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями: Учебное пособие. / Б.В. Лукутин, И.О. Муравлев, И.А. Плотников – Томск: Издательство Томского политехнического университета. – 2015 г. – 128 с.

## Приложение А

### Сравнительные экономические результаты работы Каскада Выгских ГЭС после установки оборудования и без установки оборудования за 26.03.2020.

Таблица А.1 – Зависимость отметки уровня воды в Кубанском водохранилище от объёма воды в нём

Час гр, нагр,	До установки оборудования					После установки оборудования				До установки оборудования				После установки оборудования			
	Индекс	ГЭС-3	ГЭС-5	ГЭС-6	ГЭС-7	ГЭС-3	ГЭС-5	ГЭС-6	ГЭС-7	ГЭС-3	ГЭС-5	ГЭС-6	ГЭС-7	ГЭС-3	ГЭС-5	ГЭС-6	ГЭС-7
Ч	руб/ МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт
0	1444,21	53	34	24	26	63	40	27	30	76543,13	49103,14	34661,04	37549,46	90985,23	57768,4	38993,67	43326
1	1449,63	53	34	24	26	63	40	27	30	76543,13	49103,14	34661,04	37549,46	90985,23	57768,4	38993,67	43326
2	1398,01	53	34	24	26	63	40	27	30	76543,13	49103,14	34661,04	37549,46	90985,23	57768,4	38993,67	43326
3	1396,26	53	34	24	26	63	40	27	30	76543,13	49103,14	34661,04	37549,46	90985,23	57768,4	38993,67	43326
4	1402,85	53	34	24	26	63	40	27	30	76543,13	49103,14	34661,04	37549,46	90985,23	57768,4	38993,67	43326
5	1398,32	53	34	24	26	63	40	27	30	76543,13	49103,14	34661,04	37549,46	90985,23	57768,4	38993,67	43326
6	1388,01	53	34	24	26	63	40	27	30	76543,13	49103,14	34661,04	37549,46	90985,23	57768,4	38993,67	43326
7	1385,85	53	34	24	26	63	40	27	30	76543,13	49103,14	34661,04	37549,46	90985,23	57768,4	38993,67	43326
8	1414,18	53	34	24	26	63	40	27	30	76543,13	49103,14	34661,04	37549,46	90985,23	57768,4	38993,67	43326
9	1496,94	53	34	24	26	63	40	27	30	76543,13	49103,14	34661,04	37549,46	90985,23	57768,4	38993,67	43326
10	1482,33	53	34	24	26	63	40	27	30	76543,13	49103,14	34661,04	37549,46	90985,23	57768,4	38993,67	43326
11	1432,2	53	34	24	26	63	40	27	30	76543,13	49103,14	34661,04	37549,46	90985,23	57768,4	38993,67	43326
12	1364,3	53	34	24	26	63	40	27	30	76543,13	49103,14	34661,04	37549,46	90985,23	57768,4	38993,67	43326
13	1287,44	53	34	24	26	63	40	27	30	76543,13	49103,14	34661,04	37549,46	90985,23	57768,4	38993,67	43326
14	1076,14	53	34	24	26	63	40	27	30	76543,13	49103,14	34661,04	37549,46	90985,23	57768,4	38993,67	43326
15	1017,56	53	34	24	26	63	40	27	30	76543,13	49103,14	34661,04	37549,46	90985,23	57768,4	38993,67	43326
16	954,83	53	34	24	26	63	40	27	30	76543,13	49103,14	34661,04	37549,46	90985,23	57768,4	38993,67	43326
17	892,73	53	34	24	26	63	40	27	30	76543,13	49103,14	34661,04	37549,46	90985,23	57768,4	38993,67	43326
18	870,91	53	34	24	26	63	40	27	30	76543,13	49103,14	34661,04	37549,46	90985,23	57768,4	38993,67	43326
19	940,17	53	34	24	26	63	40	27	30	76543,13	49103,14	34661,04	37549,46	90985,23	57768,4	38993,67	43326
20	1021,45	53	34	24	26	63	40	27	30	76543,13	49103,14	34661,04	37549,46	90985,23	57768,4	38993,67	43326
21	1085,41	53	34	24	26	63	40	27	30	76543,13	49103,14	34661,04	37549,46	90985,23	57768,4	38993,67	43326
22	1275,67	53	34	24	26	63	40	27	30	76543,13	49103,14	34661,04	37549,46	90985,23	57768,4	38993,67	43326
23	1400,18	53	34	24	26	63	40	27	30	76543,13	49103,14	34661,04	37549,46	90985,23	57768,4	38993,67	43326



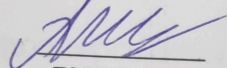


Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
САЯНО-ШУШЕНСКИЙ ФИЛИАЛ

институт  
Гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических систем и  
электрических сетей  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой



А.А. Ачитаев

подпись

инициалы, фамилия

«16»

июня

2022г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

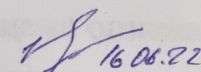
ОПТИМИЗАЦИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ОГРАНИЧЕНИЙ  
КАСКАДА ВЫГСКИХ ГЭС

13.04.02. Электроэнергетика и электротехника  
код и наименование направления

13.04.02.06. Гидроэлектростанции  
код и наименование магистерской программы

Научный руководитель

профессор кафедры  
ГГЭЭС Саяно-  
Шушенский филиал  
СФУ, д-р. техн. наук

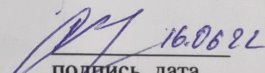
  
16.06.22  
подпись, дата

должность, ученая степень

М.Ф. Носков

инициалы, фамилия

Выпускник

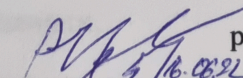
  
16.06.22  
подпись, дата

В.А. Дружинин

инициалы, фамилия

Рецензент

профессор кафедры  
Теоретических основ  
радиотехники НГТУ, д-р.  
техн. наук

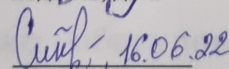
  
16.06.22  
подпись, дата

должность, ученая степень

В.П. Разинкин

инициалы, фамилия

Нормоконтроль

  
16.06.22  
подпись, дата

К.П. Синельникова

инициалы, фамилия

Саяногорск, Черемушки 2022