

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Саяно-Шушенский филиал

Кафедра гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических  
систем и электрических сетей

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ А. А. Ачитаев  
подпись  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРУПНОЙ СОЛНЕЧНОЙ СТАНЦИИ НА  
РЕЖИМНУЮ НАДЕЖНОСТЬ ПРИ ЕЁ РАБОТЕ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ**

13.04.02. Электроэнергетика и электротехника  
13.04.02.06 Гидроэлектростанции

Научный руководитель	_____ подпись, дата	Зав. кафедры ГГЭСС, СШФ СФУ, канд.техн.наук	А.А. Ачитаев
Выпускник	_____ подпись, дата		Н.С. Зоболев
Рецензент	_____ подпись, дата	Начальник ЦРВО ООО «ИСО»	А.В. Децура
Нормоконтролер	_____ подпись, дата		А.А. Чабанова

Саяногорск; Черемушки 2021

## АННОТАЦИЯ

К магистерской диссертации, студента 2 курса магистратуры Саяно-Шушенского филиала Сибирского Федерального Университета на тему «Исследование влияния крупной солнечной станции на режимную надежность при ее работе в энергосистеме».

В процессе написания диссертации была составлена математическая модель СЭС и сформированы результаты учета влияния на внешнюю сеть СЭС с многоуровневым преобразователем частоты. Рассмотрены параметры тока в сети при коротком замыкании и нормальной схеме. Отсутствие единой нормативно-технической документации создает ряд трудностей при работе новых видов станций в энергосистеме, имеющих новые качества. Исследование режимов и возможности подключения СЭС при её проектировании требует проведение множества расчетов, в том числе и учета прогнозирования электропотребления и перспективного перетока мощности в контролируемых узлах нагрузки.

*Ключевые слова:* регулирование напряжения, сетевой инвертор, солнечная электростанция, многоуровневый преобразователь частоты, посадка напряжения, удаленные КЗ, система накапливания электрической энергии, колебания мощности, режимы работы, математическая модель солнечной электростанции.

## АВТОРЕФЕРАТ

**Тема магистерской диссертации:** «Исследование влияния крупной солнечной станции на режимную надежность при ее работе в энергосистеме».

### **Актуальность:**

В настоящее время отсутствуют регламенты для ЕЭС России, которые определяли бы требования к работе крупных СЭС и ВЭС при возникновении возмущений во внешней сети, а также к участию станций на базе ВИЭ в регулировании активной мощности и частоты, реактивной мощности и напряжения. Необходимо сформулировать не только условия и требования к подключению и синхронизации крупных СЭС с энергосистемой, но и определить требования нормальной работы такого рода станций во время возникающих в энергосистеме возмущений

**Цель работы:** Определение ряда требований по осуществлению регулирования СЭС.

### **Основные задачи:**

- Учет влияния просадки напряжения при КЗ;
- Разработка структурной схемы автономного инвертора напряжения для осуществления управления режимами системы на преобразователе частоты;
- Описание схемы;
- Расчет режимов;
- Проанализировать результаты.

**Объект исследования:** Иннинская СЭС.

**Целью работы** является определение ряда требований по осуществлению регулирования СЭС

**Структура и объем диссертации:** работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованных источников. Материал изложен на 46 страницах, содержит 32 рисунка и 1 таблицу.

## **Содержание работы:**

*В первой главе* описаны современные тренды развития возобновляемых источников энергии в России и мире.

*Во второй главе* описаны проблемы отключения СЭС при возмущениях в энергосистеме, описаны способы решения этих проблем и построена структурная схемы выдачи мощности СЭС в среде MatLab.

*В третьей главе* произведены расчеты работы сети при коротких замыкания и построены необходимые характеристики

*В заключении* подведены итоги о работе, проделанной в настоящей магистерской диссертации.

## ABSTRACT

**Theme of the master's dissertation:** " Research of the influence of a large solar plant on the operational reliability of its operation in the power system".

**Relevance:**

Currently, there are no regulations for the UES of Russia that would define the requirements for the operation of large SES and wind farms in the event of disturbances in the external network, as well as for the participation of RES-based stations in the regulation of active power and frequency, reactive power and voltage. It is necessary to formulate not only the conditions and requirements for connecting and synchronizing large SES with the power system, but also to determine the requirements for the normal operation of such stations during disturbances occurring in the power system.

**The purpose of the work:** Definition of a number of requirements for the implementation of SES regulation.

**Main tasks:**

- Consideration of the effect of short-circuit voltage drawdown;
- Development of a block diagram of an autonomous voltage inverter for controlling the system modes on a frequency converter;
- Description of the scheme;
- Calculation of modes;
- Analyze the results.

**Object of study:** Ininskaya SES.

**The structure and scope of the thesis:** the work consists of an introduction, three chapters, a conclusion, and a list of references. The material is presented on 46 pages, contains 32 figures and 1 table.

**The content of the work:**

*In the first chapter* describes the current trends in the development of renewable energy sources in Russia and the world.

*The second chapter* describes the problems of switching off the SES during disturbances in the power system, describes ways to solve these problems, and builds a block diagram of the power output of the SES in the MatLab environment.

*The third chapter* , the calculations of the network operation in case of short circuits are made and the necessary characteristics are constructed

*In conclusion*, the results of the work done in this master's thesis are summarized.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 Энергетическая безопасность и современные тренды развития энергетики в России и мире .....	9
1.1 Возобновляемые источники энергии и их особенности.....	9
1.2 Возобновляемые источники энергии как экономический ресурс .....	10
1.3 Развитие возобновляемых источников энергии в России .....	14
1.4 Использование солнечной энергетики в России.....	16
1.5 СЭС Республики Алтай .....	19
2 Проблема отключения СЭС при снижении напряжения в энергосистеме при возмущениях.....	21
2.1 Влияние СНЭЭ на режимы работы СЭС .....	21
2.1.1 Особенности работы СНЭЭ .....	21
2.1.2 Сглаживание колебаний выходной мощности СЭС .....	22
2.2 Разработка и описание схемы.....	22
2.3 Принцип работы инвертора .....	24
2.4 Математическая модель ИСУЭС в векторной системе координат .....	27
3 Расчет режимов работы сети при КЗ, построение характеристик .....	29
3.1 Расчет режимов с СЭС и без.....	29
3.2 LVRT характеристики СЭС .....	31
3.3 PQ характеристики.....	32
3.4 Характеристика остаточного напряжения.....	33
3.5 Исследование режима короткого замыкания за инвертором .....	35
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	37
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	39
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Программный код.....	40
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Программный код .....	43
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Осциллограммы при остаточном напряжении 10%.....	45
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Осциллограммы при остаточном напряжении 15%.....	46
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Осциллограммы при остаточном напряжении 40%.....	47
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Осциллограммы при остаточном напряжении 80%.....	48

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний момент влияние возобновляемых источников энергии (ВИЭ) на развитие энергетики усиливается. Рост эффективности эксплуатации солнечной энергии в энергетических установках интересен не только изолированным и удаленным потребителям, но и крупным солнечным электрическим станциям (СЭС), которые могут быть рассмотрены в качестве источника возобновляемой генерации.

Вопросы, рассмотренные в данном исследовании, касаются многих проблем стохастической возобновляемой генерации, главной из которых является обеспечение параллельной работы СЭС с энергосистемой. Причиной можно отнести работу станции по случайной в зависимости от погодных условий работе и различных возмущений в электрической сети. Колебания солнечного излучения из-за изменения погодных условий служит основной причиной колебаний выходной мощности СЭС [1,2]. Поэтому, в связи с этим, умеренные колебания могут воздействовать на выработку электрической энергии традиционных электростанций.

Наиболее серьезные колебания выходной мощности СЭС зачастую происходят при максимальном уровне освещенности. Этот период обычно совпадает с периодом непиковой нагрузки электрической сети, что обуславливает наибольший уровень влияния СЭС на ЭЭС.

В качестве объекта исследования была представлена Ининская СЭС, изучено влияние СЭС на режимную надежность при ее работе в энергосистеме, на основе которого будут определены ряд таких требований по осуществлению регулирования станций, которых на данный момент нет.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее серьезные колебания выходной мощности СЭС зачастую происходят при максимальном уровне освещенности. Этот период обычно совпадает с периодом непиковой нагрузки электрической сети, что обуславливает наибольший уровень влияния СЭС на ЭЭС.

При интеграции большого объема ВИЭ существует проблема неравномерности и труднопрогнозируемости их режимов работы. При этом ошибки планирования требуют наличия большего объема резервов мощности, что влечет за собой, в конце концов, увеличение стоимости электрической энергии.

Колебания в выдаче мощности СЭС, вызванные облачностью, приводят к дополнительным расходам на обеспечение резервных мощностей и обуславливают проблемы поддержания частоты и напряжения в электрических сетях. Значительные колебания мощности повышают вероятность аварии в энергосистеме.

Величина колебаний мощности СЭС определяется ее установленной мощностью: чем больше установленная мощность СЭС, тем меньше величина колебаний мощности.

Из вышперечисленного следует, что возникают неполадки с регулированием напряжения, перегрузка или недозагрузка, а также ложные срабатывания РЗА. Дополним, что в составе СЭС имеются разного рода устройства силовой электроники, которые вызывают гармонические искажения и разными резонансами. Следовательно, колебания мощности на выходе СЭС приводят к падению качества электросети

Для решения всех вышперечисленных проблем в данном исследовании была составлена математическая модель СЭС и сформированы результаты учета влияния на внешнюю сеть СЭС с многоуровневым преобразователем частоты. Рассмотрены параметры тока в сети при коротком замыкании и нормальной схеме. Отсутствие единой нормативно-технической документации


создает ряд трудностей при работе новых видов станций в энергосистеме, имеющих новые качества. Исследование режимов и возможности подключения СЭС при её проектировании требует проведение множества расчетов, в том числе и учета прогнозирования электропотребления и перспективного перетока мощности в контролируемых узлах нагрузки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Виды и рейтинги экономических ресурсов [Электронный ресурс] / Экономическая библиотека. URL: <http://eclib.net/50/11.html>.
2. Энергетические ресурсы [Электронный ресурс] / Горная энциклопедия URL: <http://www.mining-enc.ru/e1/energeticheskie-resursy/>.
3. Альтернативные источники энергии в России: проблемы и перспективы [Электронный ресурс] / студенческий научный форум. URL: <http://www.scienceforum.ru/2014/502/770>.
4. Плюсы и минусы альтернативных источников энергии [Электронный ресурс] / Аллей паруса. URL: <http://nsportal.ru/ap/library/nauchno-tekhnicheskoe-tvorchestvo/2014/04/08/plyusy-i-minusy-alternativnykh-istochnikov>.
5. Гидроэнергия [Электронный ресурс] / энергиякрафт. URL: <http://energycraft.ru/energiya-rek-ges/2010-05-13-21-19-39.html>.
7. Ветраэнергетика [Электронный ресурс] / Центр альтернативной энергии. URL: <http://auditenergy.ru/windenergy.html>.

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Саяно-Шушенский филиал


Кафедра гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических  
систем и электрических сетей

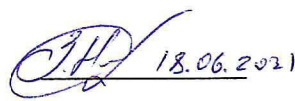
УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
 А. А. Ачитаев  
подпись  
« 18 » июня 2021 г.


**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРУПНОЙ СОЛНЕЧНОЙ СТАНЦИИ НА  
РЕЖИМНУЮ НАДЕЖНОСТЬ ПРИ ЕЁ РАБОТЕ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ**

13.04.02. Электроэнергетика и электротехника  
13.04.02.06 Гидроэлектростанции

Научный  
руководитель  18.06.21  
подпись, дата Зав. кафедры ГГЭСС,  
СПФ СФУ,  
канд.техн.наук А.А. Ачитаев

Выпускник  18.06.2021  
подпись, дата Н.С. Зоболев

Рецензент  18.06.21  
подпись, дата Начальник ЦРВО  
ООО «ИСО» А.В. Децура

Нормоконтролер  18.06.21  
подпись, дата А.А. Чабанова

Саяногорск; Черемушки 2021