

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа энергетики (ИШЭ)  
 Направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»  
 Отделение электроэнергетики и электротехники (ОЭЭ)

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Моделирование режимов работы автономной фотоэлектрической станции</b>

УДК 621.311.29.004.13

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM7Ч	Абрамов Тимофей Юрьевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭЭ ИШЭ	Обухов Сергей Геннадьевич	д.т.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭЭ ИШЭ	Обухов Сергей Геннадьевич	д.т.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭЭ ИШЭ	Обухов Сергей Геннадьевич	д.т.н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Производство и транспортировка электроэнергии	Рахматуллин Ильяс Аминович	к.т.н.		

Томск – 2019 г.

**ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП  
13.04.02«Электроэнергетика и электротехника»**

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<b>Универсальные компетенции</b>		
P1	Совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1, 3; ОПК-1, 2), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, работодателей
P2	Свободно пользоваться русским и иностранным языками как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.	Требования ФГОС (ОПК-3), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, работодателей
P3	Использовать на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-2, 3; ОПК-1; ПК-1, 2, 3), Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, работодателей
P4	Использовать представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.	Требования ФГОС (ОК-3; ОПК-1, 4), Критерий 5 АИОР (п. 1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, работодателей
<b>Профессиональные компетенции</b>		
P5	Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.	Требования ФГОС (ОПК-4; ПК- 4-6)1, Критерий 5 АИОР (п.1.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, работодателей
P6	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.	Требования ФГОС (ПК-1, 7,8). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI работодателей
P7	Выполнять инженерные проекты с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.	Требования ФГОС (ПК-2, 9, 10, 11). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, работодателей
P8	Проводить инновационные инженерные исследования в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.	Требования ФГОС (ПК-3, 13, 14, 15, 24-26). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI.
P9	Проводить технико-экономическое обоснование проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации	Требования ФГОС (ПК-11, 12, 13, 16-20, 24, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5, 2.1), согласованный с

	производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.	требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, работодателей
P10	Проводить монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы электроэнергетического и электротехнического оборудования.	Требования ФГОС (ПК-22, 23, 25, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, работодателей
P11	Осваивать новое электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.	Требования ФГОС (ПК-27, 28), Критерий 5 АИОР (п.1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, работодателей
P12	Разрабатывать рабочую проектную и научно-техническую документацию в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять оперативную документацию, предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.	Требования ФГОС (ПК-29, 30), Критерий 5 АИОР (п.1.3, 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, работодателей

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа энергетики  
 Направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»  
 Отделение электроэнергетики и электротехники

**УТВЕРЖДАЮ:**  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_  
 (Подпись)      \_\_\_\_\_  
 (Дата)      Рахматуллин И.А.

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
5AM7Ч	Абрамову Тимофею Юрьевичу

Тема работы:

Моделирование режимов работы автономной фотоэлектрической станции	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№122/с от 15.01.2019

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p>	<p>Объектом исследования являются автономные системы электроснабжения на основе фотоэлектрических преобразователей энергии. Предметом исследования являются структурные схемы, элементы конструкций и алгоритмы взаимодействия компонентов фотоэлектрического электротехнического комплекса автономного электроснабжения.</p> <p>Требования к продукту: модель автономной фотоэлектрической системы должна определять согласованность режимов производства и потребления энергии с высокой временной дискретизацией и точностью в произвольной географической точке.</p>
--	--

<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области;</li> <li>- постановка задачи исследования;</li> <li>- содержание процедуры исследования;</li> <li>- обсуждение результатов выполненной работы;</li> <li>- оценка технической и экономической эффективности разработки;</li> <li>- заключение по работе.</li> </ul>
<b>Перечень графического материала</b>	Имитационная модель в ПК MatLab/Simulink
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент	Обухов Сергей Геннадьевич
Социальная ответственность	Обухов Сергей Геннадьевич
Раздел на иностранном языке	Обухов Сергей Геннадьевич
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Solar energy review	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭЭ ИШЭ	Обухов Сергей Геннадьевич	д.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM7Ч	Абрамов Тимофей Юрьевич		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа энергетики

Направление подготовки Производство и транспортировка электроэнергии

Уровень образования Магистратура

Отделение школы (НОЦ) 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Период выполнения \_\_\_\_\_ (осенний / весенний семестр 2018 /2019 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ – ПЛАН Выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Названия раздела (модуля)/ вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
24.10.2018 г.	Аналитический обзор литературы	5
03.12.2018 г.	Оценка солнечного потенциала, анализ электропотребления	4
14.02.2019 г.	Выбор оборудования	2
21.03.2019 г.	Технико-экономическое обоснование целесообразности построения энергокомплекса	6
25.04.2019 г.	Разработка алгоритма взаимодействия между составляющими энергокомплекса	3
18.05.2019 г.	Социальная ответственность	5
22.05.2019 г.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	5
30.05.2019 г.	Оформление диссертации	10
	Итого	40

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Обухов С.Г.	д.т.н.		

**СОГЛАСНО:**

**Руководителем ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Рахматуллин И.А.	к.т.н		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

### ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

#### «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5AM7Ч	Абрамов Тимофею Юрьевичу

<b>Школа</b>	ИШЭ	<b>Отделение</b>	Электроэнергетики и электротехники
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление</b>	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

<b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:</b>	
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих.	Цена панели – 15,000 руб; Цена контроллера – 49,900 руб; Цена АКБ – 48,600 руб; Цена ДГ – 78,000 руб; Цена инвертора -93,000 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Премимальный коэффициент 30%; Коэффициент доплат и надбавок 15%; Коэффициент дополнительной заработной платы 13%; Накладные расходы 16%; Районный коэффициент 30%.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные страховые фонды 28%.
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	QuaD- анализ.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Формирование плана и графика проекта: - Определение структур работ; - Определение трудоемкости работ; - Разработка диаграммы Ганта. Формирование бюджета затрат проекта
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности
<b>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):</b>	
1. Оценочная карта QuaD-анализа 2. Календарный план-график 3. Смета затрат технического проекта	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Обухов Сергей Геннадьевич	Д.Т.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM7Ч	Абрамов Тимофей Юрьевич		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

### ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «Социальная ответственность»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5AM7Ч	Абрамов Тимофею Юрьевичу

<b>Школа</b>	<b>ИШЭ</b>	<b>Отделение</b>	Электроэнергетики и электротехники
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление</b>	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<b>Характеристика объекта исследования.</b>	Объектом исследования в данной работе были выбраны автономные системы электроснабжения на основе фотоэлектрических преобразователей энергии.
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности</b>	1. ГОСТ 12.1.003-2014; 2. СанПиН 2.2.1./2.1.1.1278-03; 3. СП 52.1330.2016; 4. ГОСТ 31967-2012; 5. ГН 2.1.6.3492-17; 6. Федеральный закон от 22.07.2013 г. №123-ФЗ
<b>2. Производственная безопасность</b>	Проанализировать потенциально возможные вредные и опасные факторы при разработке математической модели и эксплуатации оборудования.
<b>2. Экологическая безопасность</b>	анализ воздействия объекта на литосферу (отходы, утилизация компьютерной техники и периферийных устройств); обеспечение экологической безопасности.
<b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях</b>	Анализ возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; выбор наиболее типичной ЧС;

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Профессор	Обухов Сергей Геннадьевич		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5AM7Ч	Абрамов Тимофей Юрьевич		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 116 страниц, 46 рисунков, 36 таблиц, 49 литературных источников, 1 приложение.

Объектом исследования в данной работе были выбраны автономные системы электроснабжения на основе фотоэлектрических преобразователей энергии. Предметом исследования являются структурные схемы, элементы конструкций и алгоритмы взаимодействия компонентов фотоэлектрического электротехнического комплекса автономного электроснабжения. Целью работы является создание модели автономной фотоэлектрической станции с возможностью оценки эффективности использования в любой точке планеты и возможностью анализа энергетического баланса.

Для достижения поставленной цели решается ряд задач:

- выбирается конфигурация фотоэлектрической станции;
- осуществляется математическое описание каждого компонента;
- создаётся модель каждого элемента ФЭС, с возможностью изменения входных параметров и установления взаимосвязи между ними;
- производится расчёт энергетического баланса и анализ результатов;
- исследуется экономический аспект добавления ДГ.

В ходе работы использовались методы физического и математического моделирования в комплексе MatLab, методы оптимизации, методы математической статистики.

По итогу было разработано программное обеспечение, позволяющее осуществлять имитационное моделирование и определение рациональных параметров фотоэлектрических систем.

Магистерская диссертация выполнена под руководством доктора технических наук, профессора отделения электроэнергетики и электротехники Обухова С.Г. студентом группы 5АМ7Ч Абрамова Т.Ю.

Ключевые слова: автономная фотоэлектрическая станция, солнечная батарея, моделирование, MatLab, Simulink, ВИЭ.

## СОКРАЩЕНИЯ

ФЭС – фотоэлектрическая станция

АКБ – аккумуляторная батарея

ВИЭ – возобновляемые источники энергии

ФМ – фотоэлектрический модуль

СЭС – система электроснабжения

ФЭУ – фотоэлектрическая установка

КПД – коэффициент полезного действия

ДГ – дизель-генераторы

ДЭС – дизельные электростанции

СБ – солнечная батарея

MPPT – maximum power point tracker

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	12
Часть 1. Литературный обзор .....	13
1.1. Солнечная энергетика .....	13
1.2. Применение в России. ....	18
1.3. Основное оборудование ФЭС.....	20
1.4. Исследования по моделированию элементов ФЭС.....	23
Часть 2. Математическое описание элементов.....	26
2.1. Солнечная радиация. ....	26
2.2. Суточный ход температуры.....	30
2.3. Температуры поверхности фотоэлектрического модуля.....	31
2.4. Солнечная батарея. ....	32
2.5. Аккумуляторная батарея. ....	34
2.6. Нагрузка. ....	36
Часть 3. Программная реализация модели. ....	39
3.1. Солнечная радиация. ....	39
3.2. Суточный ход температуры воздуха.....	42
3.3. Модель температуры поверхности фотоэлектрического модуля. ....	44
3.4. Солнечная батарея. ....	45
3.5. Батарея аккумуляторная.....	48
3.6. Модели преобразователей.....	49
3.7. Модель нагрузки. ....	50
Часть 4. Моделирование режимов работы .....	53
4.1. Выбор параметров ФЭС.....	53
4.2. Моделирование режимов работы. ....	61
4.3. Альтернативные варианты.....	64
Заключение.....	71
Часть 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	74
Часть 6. Социальная ответственность. ....	95
Список литературы:.....	113
<b>Приложение А.....</b>	<b>117</b>

## Введение

В виду огромных территорий Российской Федерации не всегда является целесообразным и возможным обеспечить электроснабжение удалённых территорий. Решается эта проблема дизель генераторами с помощью возобновляемых источников электроэнергии соизмеримой мощности. Гибридные системы могут значительно различаться по составу источников, по архитектуре построения. Для решения задач оптимизации мощностей генерирующих источников, выбора параметров регулирующих устройств и настройки систем управления необходим тщательный анализ энергетического баланса, т.е. согласования режимов производства и потребления энергии, для чего требуется высокая дискретизация прогнозной выработки электрической энергии. Решению этой проблемы и посвящена данная работа.

В магистерской диссертации предложено решение проблемы достоверного определения энергетического баланса ФЭС с помощью разработанного программного комплекса в MatLab Simulink с высокой временной дискретизацией, 86,400 перерасчётов всех параметров за одно моделирование. Новизной является учёт в единной модели нелинейности характеристик основных элементов ФЭС, а также их зависимость от внешних факторов, случайно изменяющихся в каждый момент времени и вносящие изменения в процесс генерации. Например, температура поверхности фотоэлектрического модуля нелинейно влияет на напряжение холостого хода фотоэлемента. Описанные особенности существенно усложняют решение обозначенной задачи. Естественна необходимость учёта достаточного количества стохастических факторов в единой модели для получения достаточной точности, что вызывает необходимость применения методов математического моделирования в совокупности с практическими данными наблюдений.

## Часть 1. Литературный обзор

### 1.1. Солнечная энергетика

Запасы традиционных источников электроэнергии такие как нефть, газ и уголь, которые используются для преобразования энергии по всему миру, быстро исчерпываются. Помимо этого, продукты сгорания являются причиной глобальных проблем: парникового эффекта и загрязнений, которые отравляют и наносят огромный ущерб всему живому на планете [1]. Условия окружающей среды – одна из самых важных социально-экологических проблем, которая влияет на всех граждан [2]. В связи с этим возобновляемые источники электроэнергии (солнечная, ветряная, геотермальная) получили стремительное развитие за последнее десятилетие.

Среди этих источников фотоэлектрическая энергия широко распространена для маломощных потребителей. Огромный потенциал солнечной энергетике невозможно игнорировать. Организация Объединенных Наций оценивает потенциал солнечной энергетике в 1,575 – 49,837 ЕДж. Эта величина превышает мировое потребление электроэнергии в 2012 году, которое равнялось 567 ЕДж [3]. Потенциал солнечной энергии, которую может использовать человек, ограничена такими факторами как географическое положение приёмной поверхности, смена суток, облачность [4].

С момента первого применения энергии солнца в космической миссии в 1958 году, фотоэлектрические технологии прошли долгий путь. Программа фотоэлектрических систем (PVPS) Международного Энергетического Агенства (IEA) была основана в 1993 году, и на сегодняшний день включает в себя 32 страны участницы. Программа существует, чтобы «координировать международные совместные усилия, которые увеличивают роль солнечной энергетике в направлении устойчивости энергетических систем». Рисунок 1 графически отображает данные отчёта за 2018 год, в котором указано, что к

конецу года сумарная установленная мощность ФЭС в мире превосходит 500 ГВт, при чём 100 ГВт были построены непосредственно в 2018 году.

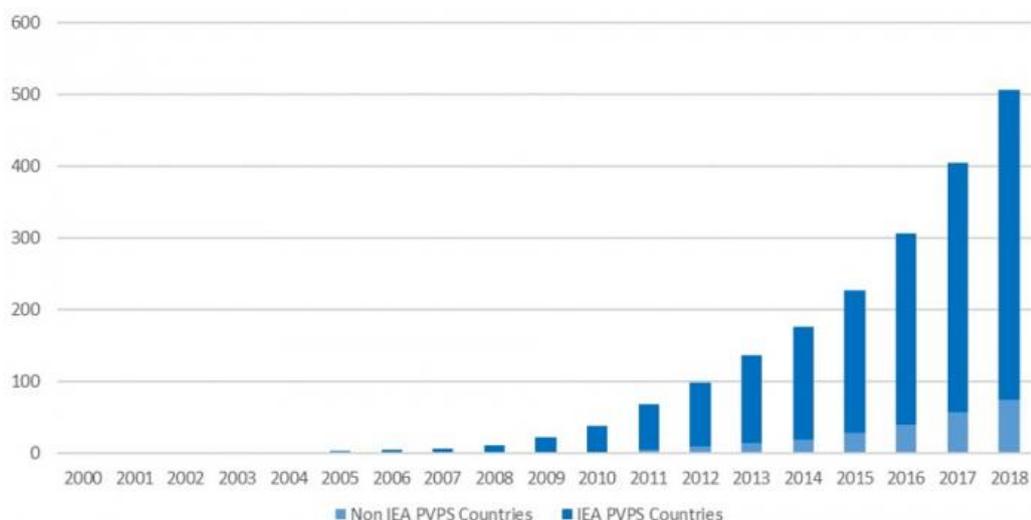


Рисунок 1– Рост мировой солнечной энергетики (ГВт) [5].

Таблица 1. Топ-10 стран по установленной мощности ФЭС на 2018 год

	Страна	Сумарная мощность, ГВт
1	Китай	176.1
2	Америка	62.2
3	Япония	56.0
4	Германия	45.4
5	Индия	32.9
6	Италия	20.1
7	Великобритания	13.0
8	Австралия	11.3
9	Франция	9.0
10	Корея	7.9
	ЕС	115.0

Отмечено, что уже 32 страны мира превзошли отметку в 1 ГВт установленной мощности. Отчёт PVPS также отмечает, что солнечная энергетика составляет примерно 2.6% от мировой генерации и 4.3% от европейской. Конечно в некоторых странах этот показатель выше, например в Германии ФЭС производят около 7.9% всего электричества [5].

В Германии в последние годы наблюдался прорыв в снижении цен в результате десятилетия массовых инвестиций в исследования и разработку. Новые солнечные фотоэлектрические электростанции в Германии сегодня стоят почти на 80 процентов дешевле, чем построенные несколько лет назад. Солнечная энергетика уже на сегодняшний день не является дорогой в реализации среди других источников возобновляемой энергии. Стоимость электроэнергии от крупномасштабных фотоэлектрических установок в Германии упала с более чем 24 руб / кВтч в 2005 году до 5.4 руб/кВтч в 2014 году. Еще более низкие цены были зарегистрированы в более солнечных регионах мира, поскольку основная доля компонентов торгуется на глобальных рынках. Солнечная энергия скоро станет самой дешевой формой электричества во многих регионах мира. Даже в консервативных сценариях и при условии отсутствия крупных технологических прорывов конца сокращению затрат не видно. В зависимости от годовой величины прихода солнечной радиации, стоимость электроэнергии к 2025 году ожидается около 2.4-3.6 руб/кВтч, и достигнет 1.2-2.4 руб/кВтч к 2050 году (согласно консервативной оценке) [6].

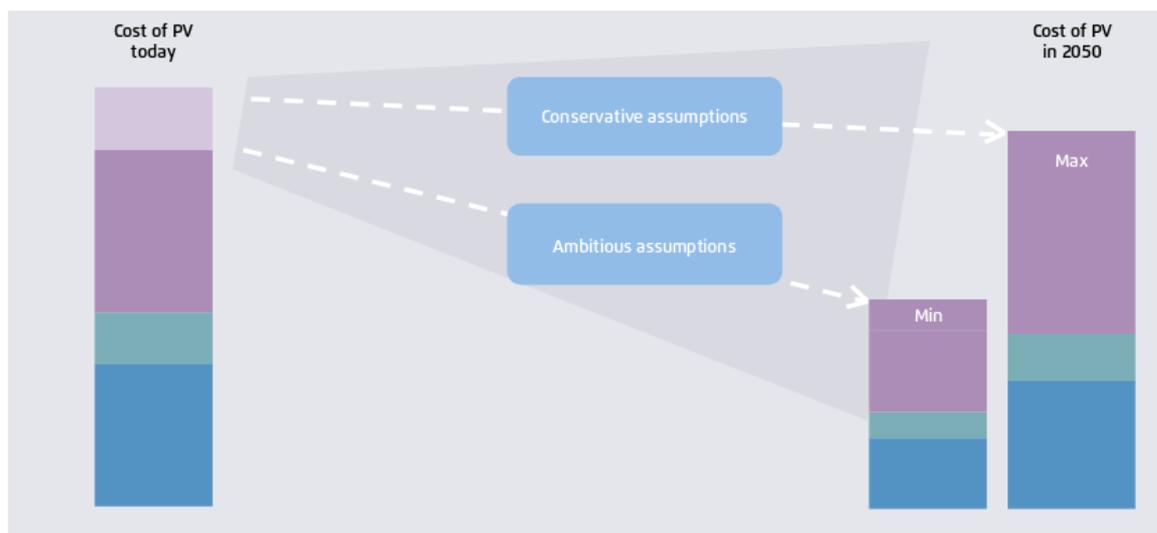


Рисунок 2 – Стоимость солнечной энергетике

Анализ [6] различных сценариев позволяет сделать вывод о том, что затраты на солнечную энергетике продолжат снижаться. Даже при самых

консервативных сценариях развития рынка, без учета технологических прорывов, ожидается значительное дальнейшее снижение затрат.

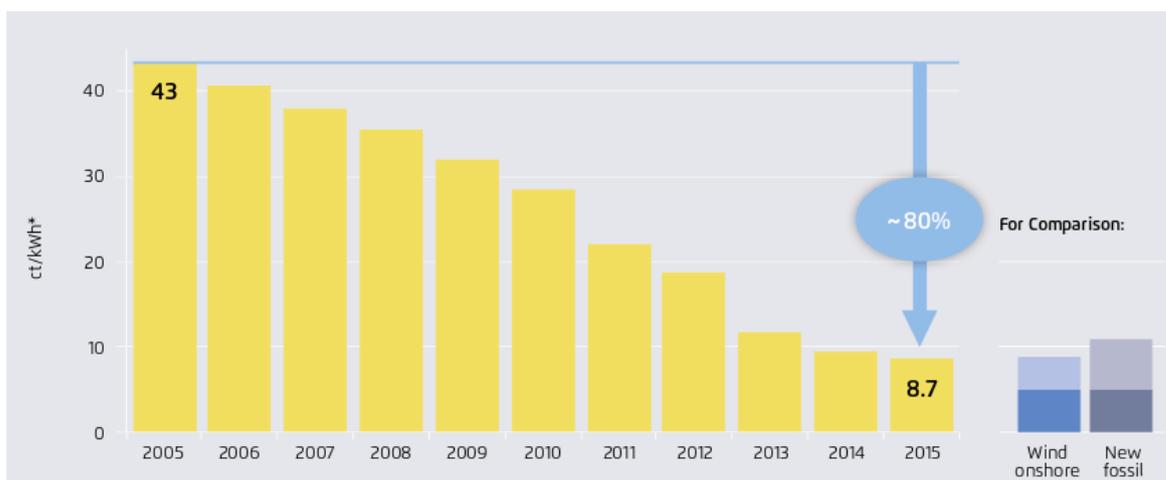


Рисунок 3 – Снижение тарифа на новую крупномасштабную солнечную энергетику в Германии (в номинальных значениях)

Следуя методике [6], был сделан вывод о глобальном развитии рынка солнечной энергетики в период между 2015 и 2050. Эти сценарии были обсуждены и пересмотрены на семинарах экспертов и представляют собой диапазон от “очень пессимистичных” до “очень оптимистичных” с точки зрения развития глобального рынка фотоэлектрики. В наиболее пессимистичном сценарии годовое увеличение установленной мощности составит 175 ГВт к 2050 году (суммарная мощность производства до 2050 года ~6000 ГВт). По самому оптимистичному сценарию (“прорывному сценарию”) к 2050 году будет устанавливаться 1780 ГВт фотоэлектрических систем в год (суммарная выработанная мощность к 2050 году: ~36000 ГВт).

Солнечные панели, которые преобразуют солнечную радиацию в электричество, имеют множество плюсов, такие как неисчерпаемое «топливо», экологическая чистота, бесшумность, отсутствие вращающихся частей, что значительно упрощает обслуживание. Но также есть и минусы: невозможность оперативного управления. Генерация сильно зависит от условий окружающей среды, поэтому невозможно спрогнозировать отпускаемую мощность в каждый момент времени, что ведёт к проблеме

согласования нагрузки и потребления. Во многих регионах мира такая характеристика солнечной радиации подразумевает невозможность использования одной лишь фотоэлектрической станции для снабжения потребителей, неподключенных к централизованной системе электроснабжения [7]. На графике представлен годовая гистограмма потребления электроэнергии и типичная гистограмма для фотоэлектрической установки в каждый месяц.

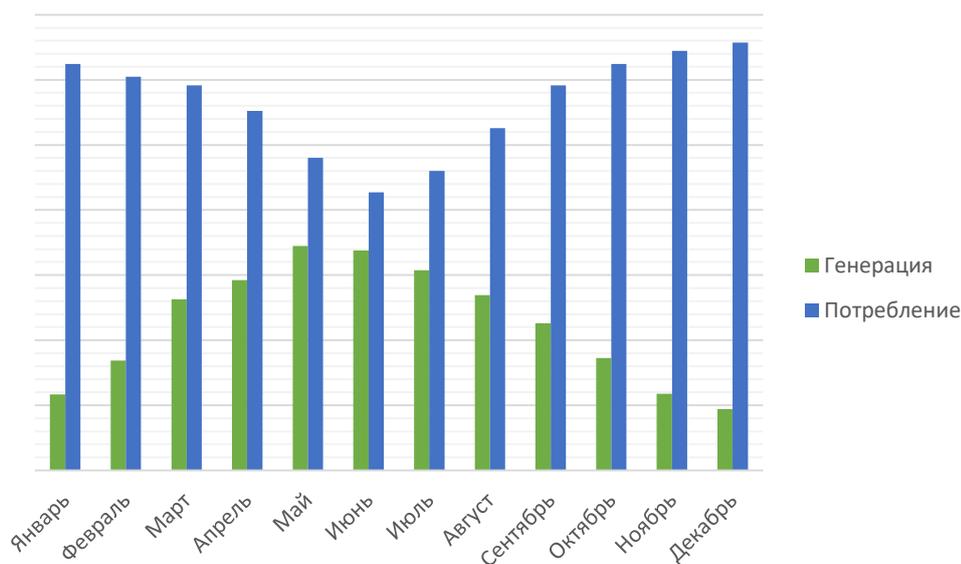


Рисунок 4 – Годовая гистограмма

По гистограмме видно, что максимум солнечная установка генерирует летом, когда уровень радиации максимален, однако нагрузка в этот самый период минимальна. Зимой ситуация обратная: очевидно, что генерация значительно меньше потребления, которое покрыть она не в состоянии.

Один из методов преодоления этой проблемы – использование солнечных панелей вместе с другими источниками электроэнергии: дизель генераторами, топливными элементами или аккумуляторными батареями [8], [9], и [10]. Автономное энергоснабжение одной лишь ФЭС весьма сомнительно, так как необходимо отстраиваться от наихудших возможных условий, а именно от зимы, когда энергопотребление максимально, а

генерация ФМ минимальна. В зимний период возможно подключение дизель генератора, что позволяет снизить количество и числа солнечных панелей, и числа АКБ. Однако подобный вопрос должен решаться в каждом конкретном случае отдельно и быть сопровождён необходимыми расчётами. Развитие именно гибридных систем является наиболее перспективно для России.

## 1.2. Применение в России.

Если посмотреть на мировые тренды, то невозможно не заметить бум роста солнечной энергетики. В течение последних нескольких лет во многих странах цена за кВтч приблизилась к цене от традиционных источников энергии. И возникает вопрос: а принимает ли Российская Федерация участие в этих процессах? Или может солнечная энергетика не для неё? Ведь она находится на Севере, а согласно стереотипам солнечная энергетика применима там, где круглый год стоит жаркая погода. Всё не совсем так. Согласно Институту энергетической стратегии, потенциал приходящей солнечной энергии на территорию России всего за три дня превосходит суммарное годовое потребление в стране. Сумарная солнечная радиация варьируется от 810 кВтч/м<sup>2</sup> в год на удаленных северных территориях до 1,400 кВтч/м<sup>2</sup> на юге. И в целом, стереотип о том, что Россия безсолнечная страна – абсолютно неверен. Во многих регионах, таких как Забайкальский край и Якутия, уровень солнечной радиации выше, чем в том же Краснодаре.

Для России, с её колоссальными запасами природных ресурсов, развитие альтернативной энергетики также считается очень важным, в виду огромных размеров и сложных климатических условий на большей части территории. На 70% территории России отсутствует централизованное электроснабжение. На этой территории проживают порядка 20 млн. человек. Высокие транспортные издержки и устойчивый рост цен на моторное топливо определяют высокие тарифы на производимую в децентрализованных системах электроснабжения электроэнергию (до 50-60 руб за кВтч), так как в удалённых районах

электроэнергия производится дизель генераторами, ввиду дороговизны или невозможности подключения потребителей к централизованной системе электроснабжения.

Возобновляемая энергетика развивается в России на протяжении шести лет. Среди достижений в отрасли можно выделить следующее. Было построено более 130 МВт возобновляемых источников (почти все из них - ФЭС) в 2014 – 2016 годах, а в 2017 году 140 МВт (100 из которых ФЭС). Средняя стоимость затрат на солнечную энергетику в 2017 году была снижена на 10.7%. Даже на сегодня экономически выгодно использовать ВИЭ на удаленных и недоступных территориях Дальнего Востока. Помимо улучшения надежности электроснабжения на удаленных территориях, приоритетным направлением развития ВИЭ в России это производство продвинутых технологий на экспорт. В солнечной энергетике был создан целый цикл – от науки и производства фотоэлектрических модулей до сбора и использования ФЭС. Третьего июля 2017 года в Новочеркасске было основано производство солнечных панелей, основанное на собственной гетероструктурной технологии. Эффективность модулей выше 22% и во всём мире всего три лидера по массовому производству с таким КПД. 19 сентября 2017 года была введена в эксплуатацию первая солнечная станция с использованием гетерогенных модулей на Маминской СЭС в республике Алтай. [11]

ДГ и ДЭС на их основе составляют основу малой энергетики России. Как источники электроэнергии автономных систем электроснабжения они наряду с очевидными достоинствами имеют и значительные недостатки, основные из которых — большой расход органического топлива на выработку 1 кВтч электроэнергии и загрязнение окружающей среды. В то же время полноценной замены им пока нет. К числу наиболее перспективных направлений повышения энергетической эффективности локальных систем электроснабжения относятся использование в энергетическом балансе

регионов возобновляемых источников энергии и оптимизация режимов работы основного энергетического оборудования. Так как для потребителей электроэнергии децентрализованных зон необходим гарантированный источник питания, наиболее целесообразными вариантами автономных систем представляются фотодизельные энергетические установки.

### 1.3. Основное оборудование ФЭС.

Основными элементами автономной ФЭС являются: СБ, состоящая из набора последовательно-параллельно соединенных ФМ, преобразователь постоянного напряжения, работающий под управлением контроллера поиска точки максимальной мощности, накопитель энергии на базе аккумуляторных батарей и выходной инвертор напряжения. Часто для повышения энергетической эффективности ФЭС ее дополнительно комплектуют системой слежения за Солнцем. В этом случае в состав ФЭС также будет входить блок управления солнечным трекером и исполнительный механизм следящей системы, построенный на базе двигателей с редукторами. Система также может включать в себя ветроустановки и другие нетрадиционные источники электроэнергии. Схема соединения элементов системы электроснабжения графически представлена на Рисунке 5.

Солнечные модули — основная часть любой фотоэлектрической системы. Принцип работы солнечного модуля (солнечной панели, солнечной батареи), основан на физических свойствах полупроводников, имеющих способность создавать, под воздействием солнечного света, электронную проводимость «р-п» типа. Между электродами устройства создается разность потенциалов, а при подключении нагрузки в цепи протекает электрический ток. Наибольшую популярность получили солнечные батареи из поликристаллических фотоэлементов. Эффективность таких панелей в среднем составляет 12-18 %.

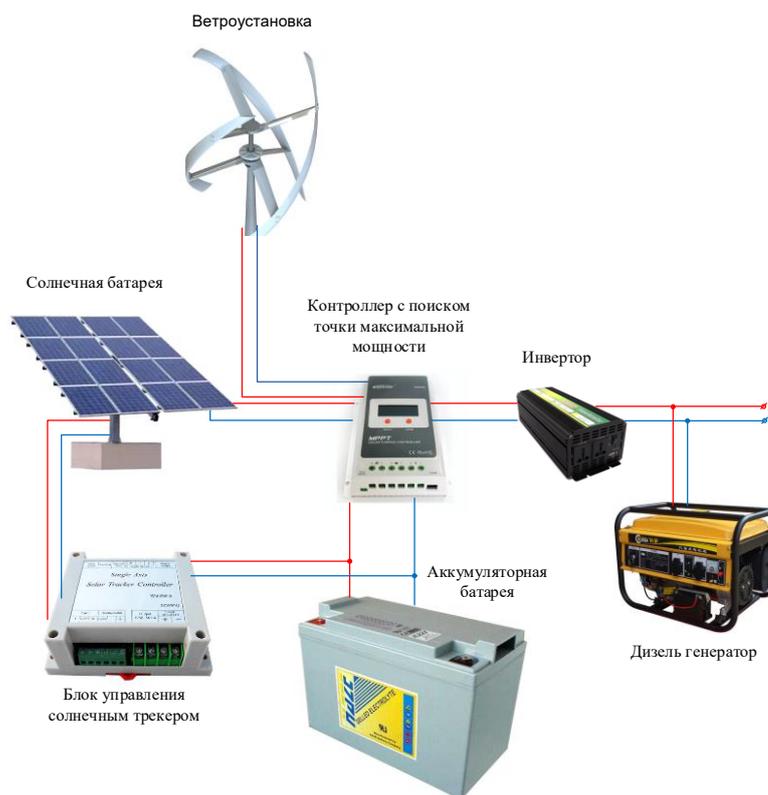


Рисунок 5 – Схема ФЭС

Панели из монокристаллических фотоэлементов характеризуются более высоким КПД (20-22 %), однако они дороже, чем панели из поликристаллов. Российская компания Хевел является одним из лидеров по производству высокоэффективных солнечных панелей на основе гетероструктурной и тонкопленочной технологий. Сравнивая батареи на 300 Вт, поликристаллическая батарея китайской фирмы SilaSolar стоит 9 000 руб. с 17% КПД, монокристаллическая стоит 12 000 руб. с 17.66% КПД, а отечественная гетероструктурная панель стоит 16 400 руб. с эффективностью в 17.92%. В случае больших мощностей рекомендуется использовать поликристаллические панели.

Преобразователь DC/DC с контролем максимальной мощности позволяет увеличить мощность от солнечных элементов, не изменяя их количество. В простых контроллерах солнечный модули подключается к аккумулятору напрямую, выравнивая напряжение. В реальности же

оптимальное напряжение солнечной батареи почти всегда отличается от напряжения на аккумуляторе. Если посмотреть на типичную вольт-амперную характеристику солнечной батареи, можно увидеть, что выработка энергии может быть увеличена, если контроллер заряда будет следить за точкой максимальной мощности солнечной батареи.

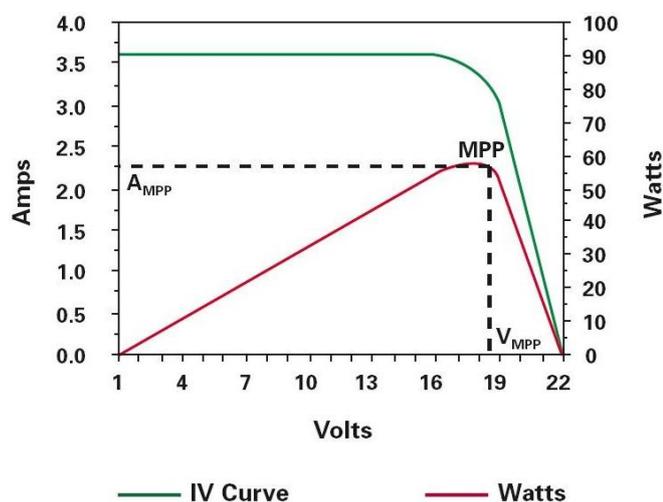


Рисунок 6 – ВАХ СБ

Российский производитель электроники MicroArt производит линейку контроллеров заряда с различными соотношениями мощностями СБ и напряжениями АКБ. Также они производят инверторы для автономных систем электроснабжения на базе ВИЭ. МАП Hybrid умеет синхронизироваться и подкачивать в сеть дома энергию от АКБ.

Аккумуляторные батареи позволяют сохранять энергию, выработанную солнечными панелями. Из-за того, что пики потребления и генерации не совпадают во времени, возникает необходимость перераспределять генерируемую энергию. Основными условиями по выбору аккумуляторов являются:

- стойкость к циклическому режиму работы;
- способность выдерживать глубокий разряд;
- низкий саморазряд;
- нечувствительность к нарушению условий зарядки и разрядки;

- долговечность;
- простота в обслуживании.

Производитель АКБ Delta производит батареи специально предназначенные для работы в составе системы автономного электроснабжения и учитывает её особенности.

Солнечный трекер используется для повышения эффективности солнечной батареи, но также и увеличивает стоимость капиталовложений. Результаты исследований [12] показывают зависимость их эффективности от времени года. Одноосевые трекеры увеличивают выработку на 40-60% в летние месяцы и на 5-12% в зимние. Для двухосевой показатели равны 44-67% и 12-16% соответственно. В годовом выражении солнечные трекеры увеличивают производительность ФЭС на 35% для одноосевой и 39% для двухосевой. Однако разница в изначальных капиталовложениях значительна, поэтому обоснованность её использования должна быть доказана на практике.

Из-за больших размеров Российской Федерации и как следствие кардинально разных климатических условий, невозможно выработать универсальную конфигурацию автономной системы электроснабжения на базе ВИЭ, в следствие этого возникает необходимость компьютерного и математического моделирования систем для конкретных условий.

#### 1.4. Исследования по моделированию элементов ФЭС.

Производительность фотоэлектрической станции зависит от широты её расположения, а также от климатических условий. Чтобы определить целесообразность, экономичность и эффективность применения ФЭС в той или иной местности производится моделирование в специальных программных комплексах, в которых производится моделирование всех элементов станции, и в которых должны учитываться все особенности окружающей среды, чтобы с высокой точностью предсказывать генерацию в каждый момент времени. Важнейшей задачей проектирования гибридных

систем с возобновляемыми энергоисточниками является согласование режимов производства и потребления энергии, для чего требуется высокая дискретизация прогнозной выработки электрической энергии различными источниками: от среднесуточной до почасовой [13]. Тщательный анализ энергетического баланса необходим для решения таких задач проектирования, как оптимизация соотношения установленных мощностей генерирующих источников, выбора параметров регулирующих устройств и настройки систем управления [14, 15].

По данной проблематике было написано множество статей. А.Е. Vadoud [16] в своей работе разработал библиотеку графических моделей для всех компонентов ФЭС. Подробную модель прихода солнечной радиации на произвольно-ориентированную поверхность предложили С.Г. Обухов и И.А. Плотников [17]. Сравнив полученные результаты с результатами наземных измерений по метеостанциям, ошибка моделирования составляет менее 11,7% для суммарной солнечной радиации. Анализ ошибки показал отсутствие систематической погрешности, так как ошибки распределены равномерно относительно нулевого уровня. M.G. Villalva [18] предложила метод моделирования фотоэлектрического модуля (ФМ), особенностью которого является нахождение параметров выражения, описывающего ВАХ, и влияние температурного эффекта на них. S. J. Chiang [19] описал ФЭС для жилых домов, в которой используется DC/DC контроллер с поиском точки максимальной мощности и подключенная аккумуляторная батарея. С.С. Пост и другие [20] в среде Simulink создали имитационную модель контроллера солнечной батареи, логика функционирования которой соответствует логике функционирования реального контроллера в различных режимах: в режиме заряда аккумуляторной батареи постоянным током заданной величины, в режиме поиска точки экстремального регулирования солнечной батареи, в режиме заряда аккумуляторной батареи снижающимся током при достижении напряжения аккумуляторной батареи определённого уровня, также модель

осуществляет контроль за состоянием аккумуляторной батареи и, в случае снижения напряжения аккумуляторной батареи до нижнего уровня, отключает нагрузку. Т. Esran [21] сравнил разные системы МРРТ, и объяснил девятнадцать методов построения МРРТ. Краткое изложение всех этих методик позволяет правильно выбрать нужную для каждой ФЭС. Множество работ посвящено моделированию аккумуляторных батарей. О. Tremblay [22] предложил модель батареи на основе обобщенного выражения Шеферда. А в другой статье вместе с L-A. Dessaint в модели математического описания работы аккумуляторной батареи предложили более точный метод, используя фильтрационный ток, протекающий через поляризационное сопротивление [23]. Разработкой модели нагрузки занимались С.Г. Обухов и З.П. Хошнау, которые предсказывали энергопотребление посёлков на основании вероятностно-статистических методов и нормативных документов, действующих в РФ. Предлагаемая методика предполагает расчет и построение для каждого вида нагрузок: бытовой, социальной и производственной своего характерного суточного графика с их последующим суммированием.

Вывод. В России в виду дороговизны электроснабжения удаленных от центральных электрических сетей районов дизель генераторами, широкое развитие получают автономные гибридные станции на базе ВИЭ, так как позволяют снизить затраты на топливо и увеличить срок эксплуатации генератора. Из-за особенностей каждой отдельно взятой местности невозможно построить универсальную систему электроснабжения, что влечёт за собой построение уникальной конфигурации параметров СЭС для каждого отдельного потребителя. На данный момент активно ведутся исследования по моделированию энергетического баланса автономных СЭС, которые позволяют учесть внешние стохастические факторы для наиболее точного определения прогнозируемой мощности с высокой временной дискретизацией.

## Часть 2. Математическое описание элементов.

Математическое описание элементов и процессов представляет собой приведение и пояснение формул и законов, которыми описывается влияние окружающей среды на работу ФЭС, а также закономерности работы компонентов ФЭС. Особенностью является описание нелинейных характеристик элементов и их зависимость от внешних параметров. По представленным формулам будет производиться моделирование фотоэлектрической установки.

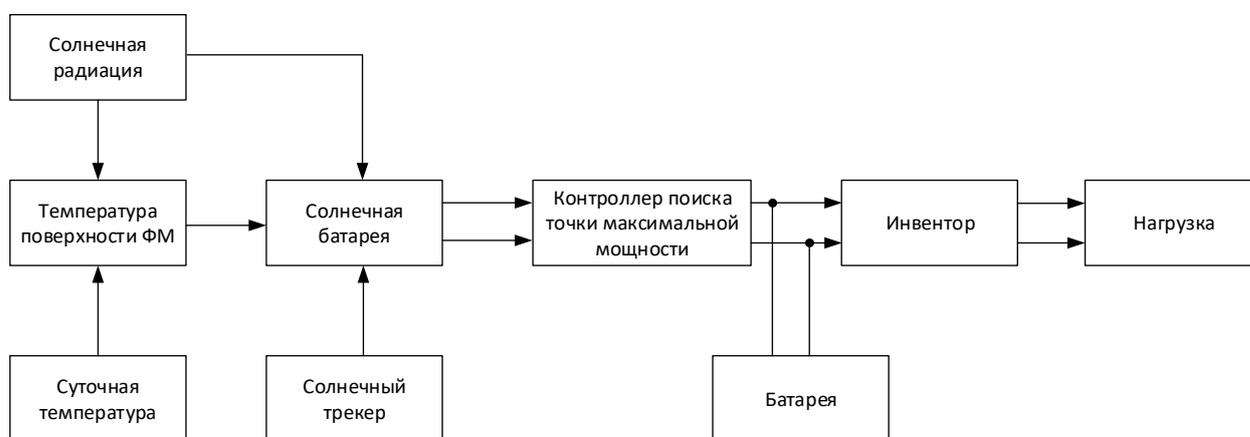


Рисунок 7 – Блок-схема расчёта автономной фотоэлектрической станции

### 2.1. Солнечная радиация.

Интенсивность солнечного излучения за пределами атмосферы Земли практически постоянна и равна  $1367 \text{ Вт/м}^2$ . Однако существуют стохастические факторы, оказывающие влияние на интенсивность излучения на поверхности Земли – состояние атмосферы и ориентация приёмной поверхности. Конечной задачей моделирования солнечной радиации является определение величины приходящей солнечной радиации каждую секунду для любого дня года в произвольном географическом месте размещения ФЭС, что обуславливает моделирование всех факторов, оказывающих изменение на солнечную радиацию.

Величина солнечной радиации на поверхности зависит от множества факторов, таких как взаимное расположение поверхности солнечной панели и Солнца, изменение этих параметров в течение суток, месяца и года, а также от уровня облачности и расположения солнечной панели на Земле.

Конечная солнечная радиация на произвольно-ориентированную приёмную поверхность на поверхности Земли рассчитывается по формуле:

$$I_{\text{сум}}^{\beta\gamma} = I_{\text{пр}}^{\beta\gamma} + I_{\text{рас}}^{\beta\gamma} + I_{\text{отр}}^{\beta\gamma} = I_{\text{пр}}^{\text{гор}} \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} + I_{\text{рас}}^{\text{гор}} \cos^2 \left( \frac{\beta}{2} \right) + \rho I_{\text{сум}}^{\text{гор}} \sin^2 \left( \frac{\beta}{2} \right) \quad (1)$$

$I_{\text{сум}}^{\beta\gamma}, I_{\text{пр}}^{\beta\gamma}, I_{\text{рас}}^{\beta\gamma}, I_{\text{отр}}^{\beta\gamma}$  – значения суммарной, прямой, рассеянной и отраженной солнечных радиаций на случайно ориентированную поверхность,  $\text{Вт}/\text{м}^2$  [24];

$I_{\text{пр}}^{\text{гор}}, I_{\text{рас}}^{\text{гор}}, I_{\text{отр}}^{\text{гор}}$  – значения прямой, рассеянной и отражённой солнечных радиаций на горизонтально ориентированную поверхность,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$\theta$  – угол между направлением потока солнечного излучения к поверхности и нормалью к ней;

$\theta_z$  – зенитный угол Солнца;

$\beta$  – угол наклона приёмной поверхности;

$\rho$  – альbedo земной поверхности (отношение отражённой от поверхности энергии к падающей);

Величина  $\theta$  определяется из решения уравнения [25]:

$$\theta = \arccos \left( \begin{aligned} & (\sin \varphi \cos \beta - \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma) \sin \delta + \\ & + \cos \delta (\sin \beta \sin \gamma \sin \omega + (\cos \varphi \cos \beta + \sin \beta \sin \varphi \cos \gamma) \cos \omega) \end{aligned} \right) \quad (2)$$

где:

$\varphi$  – широта местности в точке установки приёмной площадки;

$\gamma$  – азимут приёмной поверхности;

$\delta$  – угол склонения Солнца (угол между линией, соединяющей центры Земли и Солнца, и её проекцией на плоскость экватора);

$\omega$  – часовой угол (угол, измеренный в экваториальной плоскости между проекцией линии, проходящей через центр Земли и месте установки солнечной панели, и проекцией линии, соединяющей центры Земли и Солнца).

Угол склонения находится по формуле:

$$\delta = 23,45 \sin(0,9863 \cdot (N + 284)), \text{ град}; \quad (3)$$

Азимутальный угол положения Солнца (угол в горизонтальной плоскости между проекцией солнечного луча и направлением на юг) является решением выражения:

$$\cos A_z = \frac{\sin h \sin \varphi - \sin \delta}{\cos h \cos \varphi}. \quad (4)$$

Высота подъёма солнца над горизонтом [ $h$ ] (угол в вертикальной плоскости между солнечным лучом и его проекцией на горизонтальную плоскость) плюс зенитный угол [ $\theta_z$ ] (угол между солнечным лучом и нормалью к горизонтальной плоскости) равна  $90^\circ$ , следовательно:

$$h = 90^\circ - \theta_z, \text{ град}; \quad (5)$$

Зенитный угол Солнца определяется по выражению:

$$\theta_z = \arccos(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega), \text{ град}. \quad (6)$$

Часовой угол вычисляется по формуле:

$$\omega = 15(t - 12 - T_{yg} - \Delta T_{UTC}) + \psi, \text{ град}. \quad (7)$$

где  $t$  – текущее официальное местное время, ч;  $\Delta T_{UTC}$  – разница между местным официальным временем и средним временем по Гринвичу, ч;  $\psi$  – географическая долгота точки размещения приемной площадки, град.

Временная поправка на уравнение времени определяется по формуле:

$$T_{yg} = \frac{1}{60}(9,87 \sin(2B) - 7,53 \cos(B) - 1,5 \sin(B)), \text{ ч}; \quad (8)$$

где  $B = 0,9863(N - 81)$ , град;  $N$  – номер календарного дня с начала года.

Внеатмосферная радиация на горизонтальную поверхность, которая определяется по формуле Спенсера [25]:

$$I_0 = 1367(1 + 0,033 \cos(0,9863N)) \cos(\theta_z), \frac{Вт}{м^2} \quad (9)$$

Расчёт прямой радиации на горизонтальную поверхность считается через индекс прозрачности атмосферы:

$$I_{np}^{zop} = I_0 K_T \quad (10)$$

Величина рассеянной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность, считается через диффузный коэффициент, учитывающий рассеивание на молекулах и твёрдых частиц в атмосфере:

$$I_{расc}^{zop} = I_{np}^{zop} K_D \quad (11)$$

Индекс прозрачности атмосферы и диффузный коэффициент можно получить из базы данных NASA [26].

$$I_{сум}^{zop} = I_{np}^{zop} + I_{расc}^{zop} \quad (12)$$

Суммарная радиация используется для определения величины падающего солнечного излучения на поверхность, чтоб получить отражённую величину излучения от поверхности, получаемую при умножении на альbedo земной поверхности.

$$I_{отр}^{zop} = \rho I_{сум}^{zop} \quad (13)$$

Взаимосвязь описанных в модели компонентов с выделением исходных параметров зелёным цветом представлена на Рисунке 8.

Представленный порядок расчёта величины прихода солнечной радиации представляет собой стандартный набор формул для математического описания модели.

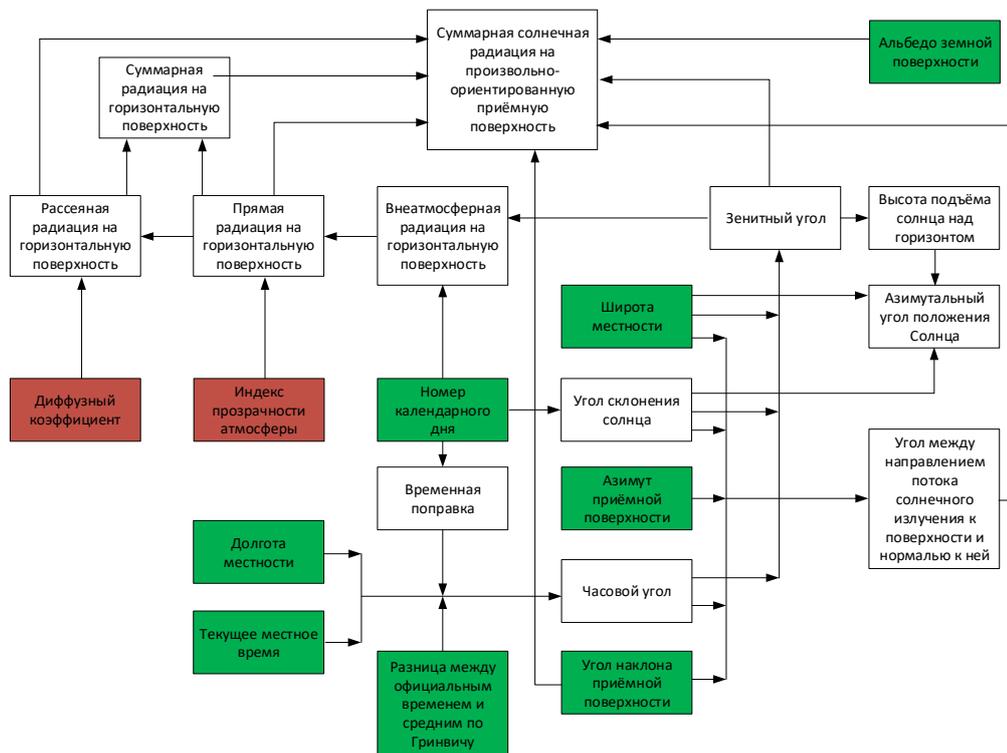


Рисунок 8 – Блок-схема расчёта солнечной радиации

## 2.2. Суточный ход температуры.

Особенностью России является то, что диапазон изменения температуры во многих районах от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Этот фактор значительно влияет на годовой уровень выработки электроэнергии, поэтому не может быть не учтён.

Изменение температуры имеет ярко–выраженный суточный характер. Температура воздуха изменяется в суточном ходе вслед за температурой земной поверхности. Поскольку воздух нагревается и охлаждается от земной поверхности, рост температуры воздуха начинается вместе с ростом температуры почвы (минут на 15 позже) утром, после восхода солнца. В 13-14 ч (зависит от широты) температура почвы начинает понижаться. В 14-15 ч начинает падать и температура воздуха. Таким образом, минимум в суточном ходе температуры воздуха у земной поверхности приходится на время вскоре после восхода солнца, а максимум - на 14-15 ч. В соответствии с процессом изменения температуры воздуха, очевидно, что кривая суточного хода температуры имеет форму близкую к синусоиде.

В климатологии обычно рассматривается суточный ход температуры воздуха, осредненный за многолетний период. В таком осредненном суточном ходе неперiodические изменения температуры, приходящиеся более или менее равномерно на все часы суток, взаимно погашаются.

Для расчёта температуры можно воспользоваться формулой:

$$T(t) = \bar{T} + 0,5\Delta T \cos\left(2\pi \frac{t_{мест} - t_{max}}{t_{nep}}\right), \quad (14)$$

где  $\bar{T}$  – среднесуточная температура воздуха, °C;

$\Delta T$  – суточная амплитуда температуры воздуха, °C;

$t_{nep}$  – период изменения температуры воздуха, ч;

$t_{max}$  – местное время максимума температуры, ч;

$t_{мест}$  – местное солнечное время, ч.



Рисунок 9 – Блок-схема расчёта суточного хода температуры

### 2.3. Температуры поверхности фотоэлектрического модуля.

Эффективность солнечной батареи в значительной мере зависит от температуры её поверхности. При увеличении температуры эффективность солнечных батарей снижается. С ростом температуры поток электронов нарастает, что вызывает увеличение силы тока и падение напряжения. Падение напряжения при этом больше, чем увеличение силы тока. Поэтому

общая мощность ( $P = UI$ ) уменьшается, что приводит к тому, что панель работает с меньшей эффективностью.

Солнечные батареи в большинстве случаев испытывают при стандартной температуре 25°C. Рабочая температура устанавливается в результате теплообмена его поверхности с окружающей средой. В зависимости от местонахождения, повышенная температура может снижать эффективность солнечных батарей на 10% – 15%. При превышении температуры на 1 градус выше 25°C, эффективность уменьшается на величину, называемую температурным коэффициентом. В результате эксплуатации температура солнечной панели может превышать температуру окружающей среды на 30°C, поэтому учёт температуры поверхности необходим. В связи со сложностью определения температуры ФМ теоретически, используется эмпирическая зависимость [27]:

$$\Delta T_{FM} = 0.0283G - 0.0058GV + 0.0005GV^2, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (15)$$

где  $G$  – уровень солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>,  $V$  – скорость ветра, м/с.

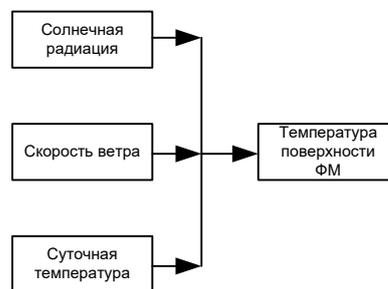


Рисунок 10 – Блок-схема расчёта температуры поверхности ФМ

#### 2.4. Солнечная батарея.

Выходная мощность солнечной панели описывается математическим выражением [28]:

$$P_{VV} = \frac{C_{FF} N_{FM} \eta_{con} G \ln(G \cdot 10^6)}{T_{FM}} \quad (16)$$

где  $N_{FM}$  – число ФМ в СБ;  $C_{FF}$  – постоянный коэффициент СБ;  $\eta_{con}$  – КПД преобразователя с контроллером максимальной мощности;  $G$  – текущий уровень солнечной радиации,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $T_{FM}$  – текущая температура ФМ.

Значение выходной мощности во многом зависит от условий окружающей среды. Физические стохастические величины (скорость ветра, уровень солнечной радиации, температура окружающей среды) учтены в величине текущей температуры поверхности ФМ.

Постоянный коэффициент СБ зависит от значений параметров ФМ.

$$C_{FF} = \frac{FF \cdot T_{ref} \left( I_{sc} + k_I (T_{FM} - T_{ref}) \right) \left( V_{oc} + k_V (T_{FM} - T_{ref}) \right)}{G_{ref} \ln(G_{ref} \cdot 10^6)} \quad (17)$$

Где  $FF$  – коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики (ВАХ) ФМ;  $T_{ref}, G_{ref}$  – значения температуры и освещённости ФМ при стандартных условиях;  $k_I, k_V$  – температурные коэффициенты тока короткого замыкания и напряжения холостого хода ФМ. Коэффициент заполнения — параметр, определяющий нелинейное электрическое поведение фотоэлемента. Коэффициент заполнения определяется как отношение максимальной мощности фотомодуля к произведению напряжения холостого хода и тока короткого замыкания.

$$FF = \frac{I_{MPP} V_{MPP}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (18)$$

где  $I_{MPP}, V_{MPP}$  – паспортные значения тока и напряжения ФМ в точке максимальной мощности при стандартных условиях;  $I_{sc}, V_{oc}$  – паспортные значения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода ФМ при стандартных условиях.

В справочных данных  $FF$  часто используется для определения максимальной мощности, которую фотоэлемент может обеспечить с оптимальной нагрузкой при заданных условиях.

Для любых заданных условий эксплуатации фотоэлементы имеют одну рабочую точку в которой мгновенные значения тока и напряжения фотоэлемента определяют мгновенную мощность в рабочей точке. Согласно закону Ома, эти значения соответствуют конкретному сопротивлению нагрузки, которое эквивалентно  $U/I$ . Мощность  $P$  определяется по формуле  $P=UI$ . На полезном участке вольт-амперной характеристики фотоэлемент действует как источник постоянного тока.

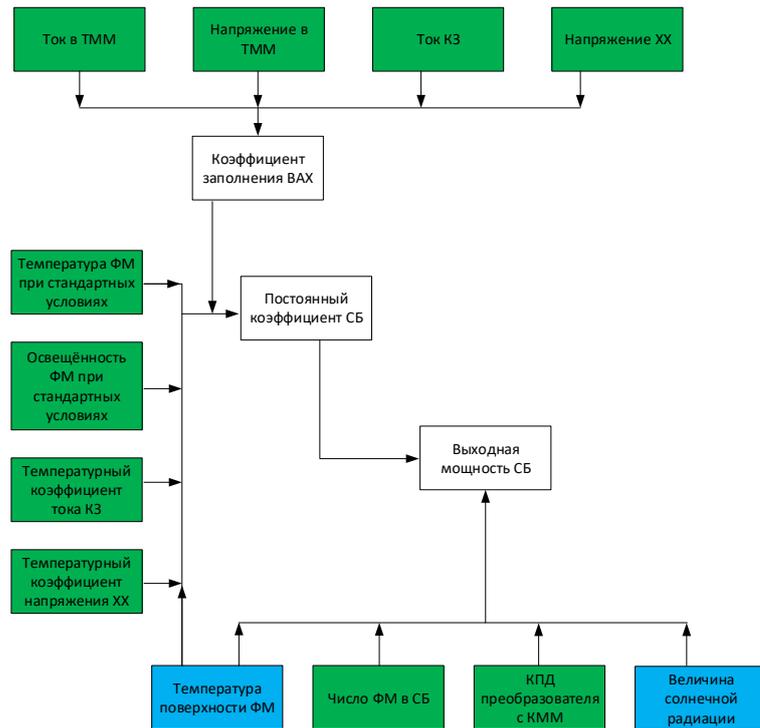


Рисунок 11 – Блок-схема расчёта солнечной панели

## 2.5. Аккумуляторная батарея.

Опишем значение выходного напряжения на контактах аккумуляторной батареи по формуле, предложенной О. Tremblay и Louis-A. Dessaint из работы [23]:

$$U_{batt} = E_0 - Ri - \frac{KQ}{Q - \int idt} + Ae^{-B \int idt} \quad (19)$$

где,  $U_{batt}$  – напряжение на выходных контактах АБ, В;  $E_0$  – ЭДС холостого хода, В;  $R$  – внутреннее сопротивление АКБ, Ом;  $i$  – ток батареи, А;  $K$  –

напряжение поляризации,  $Om$ ;  $Q$  – ёмкость АКБ;  $\int idt$  – фактический уровень заряда АКБ,  $Aч$ ;  $A, B$  – коэффициенты, характеризующие величину падения напряжения во время экспоненциальной зоны разряда ( $B$ ) и обратную величину ёмкости АКБ в конце экспоненциальной зоны разряда  $(A \cdot ч)^{-1}$ .

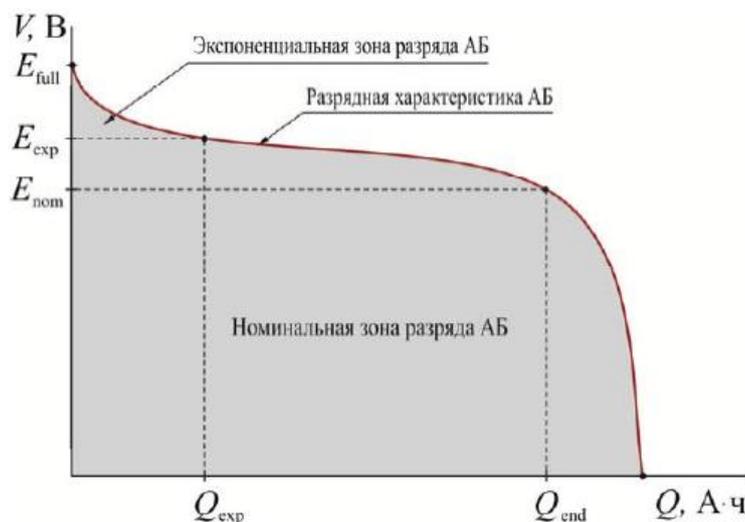


Рисунок 12 – Кривая зависимости ЭДС аккумулятора от заряда, отданного аккумулятором

Уравнение описывают форму разрядной кривой. Как видно на графике, напряжение на выходных клеммах батареи зависит линейно от величины текущей ёмкости почти на всём диапазоне, за исключением зон полной зарядки АКБ и её полной разрядки.

Из-за сложности определения коэффициентов, характеризующих величину падения напряжения во время экспоненциальной зоны разряда и обратную величину ёмкости АКБ в конце экспоненциальной зоны разряда, они были приняты равными нулю. Допущение не оказывает значительного влияния на результаты моделирования, потому что свинцово-кислотные аккумуляторы, характерные в использовании в составе автономных СЭС, имеют глубину разряда равную 60%, т.е. напряжение измененется лишь в номинальной зоне разряда. Влияние остальных факторов на напряжение батареи графически представлено на Рисунке 13.

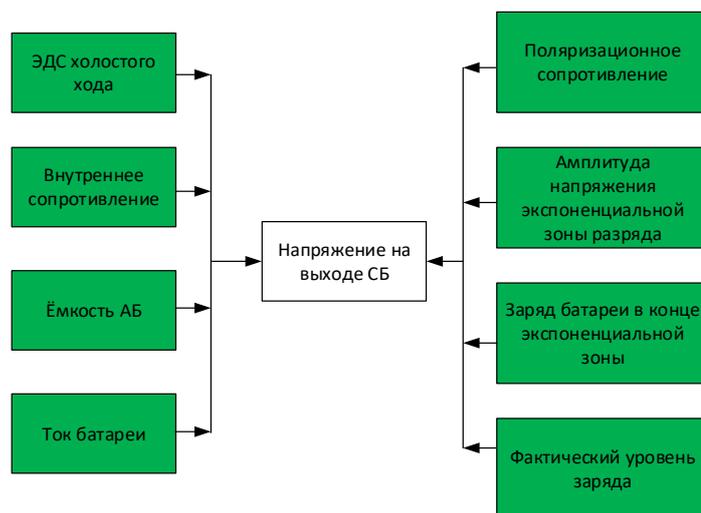


Рисунок 13 – Блок-схема расчёта аккумуляторной батареи.

В результате принятых допущений, математическое описание аккумуляторной батареи имеет вид:

$$U_{batt} = E_0 - Ri - \frac{KQ}{Q - \int idt} \quad (19.1)$$

## 2.6. Нагрузка.

Одним из способов задания электрической нагрузки является вероятностная модель. Вероятностно-статистические графики нагрузок представлены в виде математических ожиданий активных и реактивных мощностей в различные часы суток в процентах от математического ожидания максимальной активной нагрузки каждого сезона года. Для всех часов суток каждого сезона приведены значения коэффициентов вариации, равные отношению среднеквадратического отклонения к соответствующему математическому ожиданию:

$$C_P = \frac{\sigma_P}{\bar{P}}; C_Q = \frac{\sigma_Q}{\bar{Q}}, \quad (20)$$

где  $C_P, C_Q$  – коэффициенты вариации активной и реактивной нагрузки, соответственно;

$\bar{P}, \bar{Q}$  – математическое ожидание максимальной нагрузки;

$\sigma_P, \sigma_Q$  – среднее квадратическое отклонение максимальной нагрузки;

Пересчет типового графика на любую другую нагрузку производится через коэффициент подобия  $X$ , для определения которого используется выражение:

$$X = \frac{\sqrt{\left(\frac{\beta \cdot C_P \cdot \bar{P}}{100}\right)^2 + \bar{P} \cdot P_M} - \frac{\beta \cdot C_P \cdot \bar{P}}{100}}{\bar{P}}, \quad (21)$$

где  $P_M$  – максимальная нагрузка;  $\beta$  – коэффициент надежности расчета (при вероятности 0,975  $\beta=2$ ).

Показатели пересчитываемого графика  $P_{ij}$  для расчета нагрузки любого  $i$ -го часа и месяца и их среднее квадратическое отклонение  $\sigma_{P_{ij}}$  определяются по выражениям:

$$\bar{P}_{ij} = \frac{\bar{P} \cdot \bar{P}_{ik} \cdot X^2 \cdot k_{Pj}}{100}, \quad \sigma_{P_{ij}} = \frac{2 \cdot \bar{P} \cdot C_{Pik} \cdot X \cdot k_{Pj}}{100}, \quad (22)$$

где  $k_{Pj}$  – коэффициент сезонности;  $\bar{P}_{ik}$  – математическое ожидание активной нагрузки  $i$ -го часа  $k$ -го сезона (определяется по статистическим графикам).

Максимальное значение активной нагрузки за  $i$ -й час:

$$P_{ij} = \bar{P}_{ij} + \beta \cdot \sigma_{P_{ij}} \quad (23)$$

С использованием соответствующего типового графика по выражениям (20)-(23) можно рассчитать вероятностный суточный график электрических нагрузок для каждой группы потребителей: бытовая, социальная и производственная нагрузка. Применяя теоремы сложения математических ожиданий и дисперсий, легко найти суммарный график электрических нагрузок для всего населенного пункта.

Вывод: вторая часть магистерской диссертации посвящена представлению и описанию математических моделей автономной ФЭС и её компонентов. Формулы описывают физические процессы внутри компонентов СЭС и их связывают их между собой. Блок диаграммы были добавлены для более наглядной графической иллюстрации влияния параметров друг на друга. На основе представленных формул будет разработан программный комплекс для автоматического расчёта энергетического баланса СЭС.

Моделирование автономной фотоэлектрической станции включает в себя шесть основных компонентов: модель прихода солнечной радиации, солнечная батарея, преобразователь постоянного напряжения (контроллер заряда), аккумуляторная батарея, инвертор, электрическая нагрузка. Все модели обладают свойством масштабирования, что позволяет проводить исследования фотоэлектрических систем произвольной конфигурации. Особенностью предложенной модели является учет влияния внешних климатических факторов на энергетические характеристики солнечной батареи, что обеспечивает повышение точности прогнозных расчетов в выработке электроэнергии.

## Часть 3. Програмная реализация модели.

Необходимым условием построения модели электростанции является согласование моделей элементов в составе единой энергетической системы, что определяет выбор единого универсального инструмента моделирования. В настоящей работе модели всех компонентов электростанции реализованы в MatLab/Simulink в виде отдельных подсистем, что позволяет использовать их для исследования режимов ФЭС произвольной конфигурации.

### 3.1. Солнечная радиация.

Входными данными служат 8 величин, которые и определяют величину конечной солнечной интенсивности: номер календарного дня с начала года; широта местности; наличие трекера; азимутальный угол установки панели; угол наклона панели; альbedo земной поверхности; индекс прозрачности атмосферы; разница между местным временем и Гринвичем.

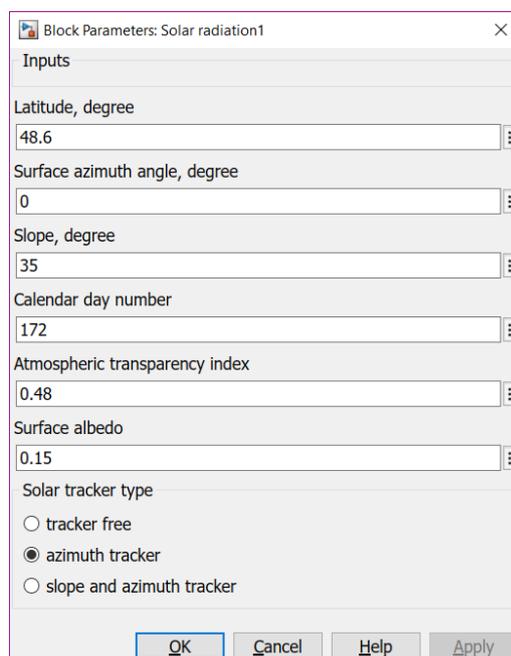


Рисунок 14 – Окно для ввода начальных данных

В MatLab входные величины задаются через блок параметров Constant.

В модель включена возможность учёта солнечного трекера по азимуту, азимуту и углу наклона, а также его отсутствие.

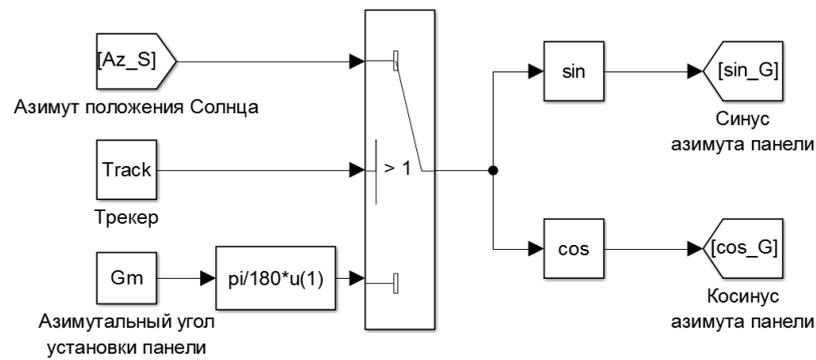


Рисунок 15 – Азимут приёмной поверхности

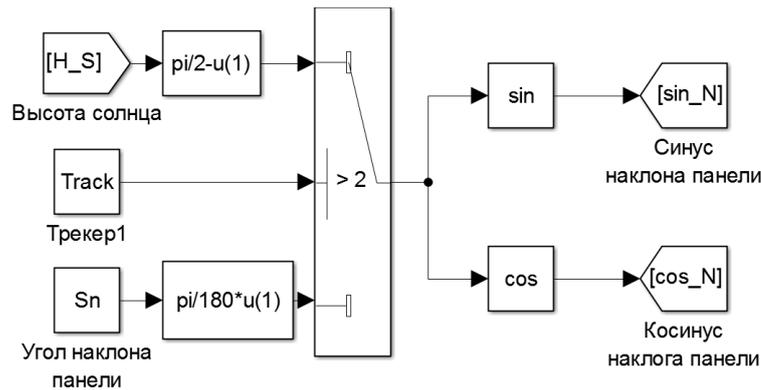


Рисунок 16 – Угол наклона приёмной поверхности

При отсутствии солнечного трекера блок Track генерирует 1, тогда, согласно заданной модели, углы наклона и азимута панели равны величинам, заданным проектировщиком. При наличии солнечного трекера по азимуту блок Track генерирует 2, при этом азимут панели будет приравняться к азимуту положения Солнца, образуя систему слежения. При наличии трекера по азимуту и углу наклона блок Track генерирует 3, при этом значении угол наклона панели согласуется с высотой подъёма Солнца, и его азимутальным углом.

В созданной системе возникает необходимость ежесекундного определения высоты подъёма Солнца и его азимута. Эта задача выполняется по формулам (5) и (4).

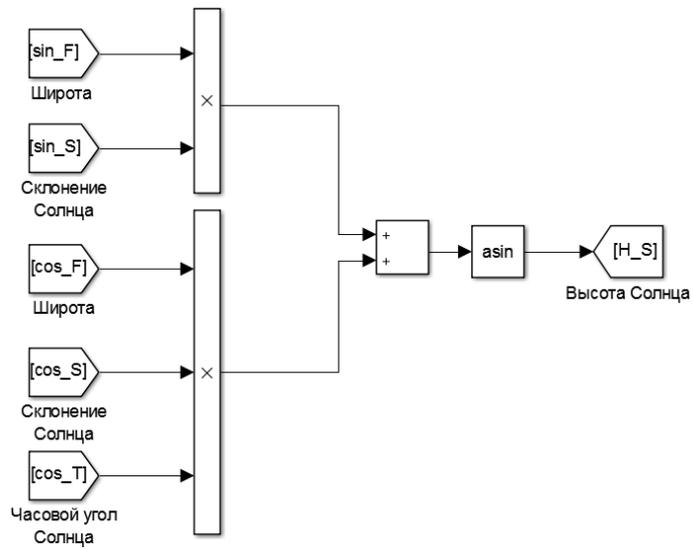


Рисунок 17 – Высота подъёма солнца над горизонтом

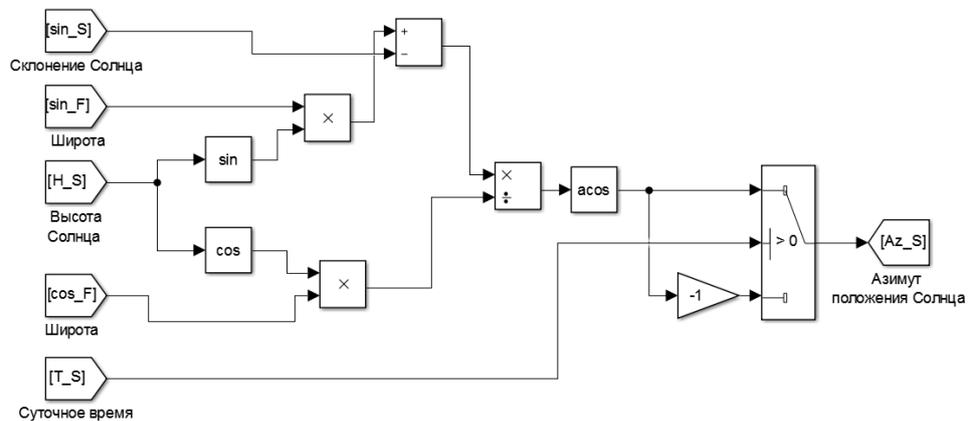


Рисунок 18 – Азимут Солнца

В соответствии с формулами, приведёнными в разделе математического описания модели прихода солнечной радиации, конечная величина уровня радиации, приходящей на фотоэлемент:

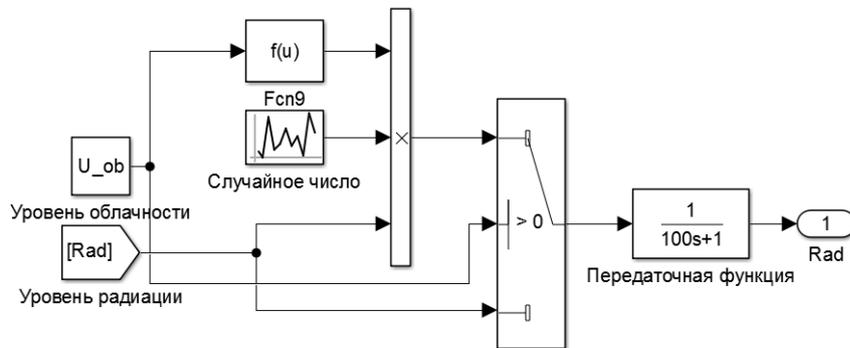


Рисунок 19 – Выходная величина солнечной радиации

Результатом моделирования является кумулятивная величина солнечной радиации на квадратный метр за сутки, а также график изменения её величины. В модель также включена возможность имитации разрыва облачности, которая используется для исследования динамики процессов и может быть включена опционально. Для демонстрации работы системы представлен Рисунок 20, на котором справа представлен график без солнечного трекера, а слева и с трекером, и с включенной системой учёта разрыва облачности.

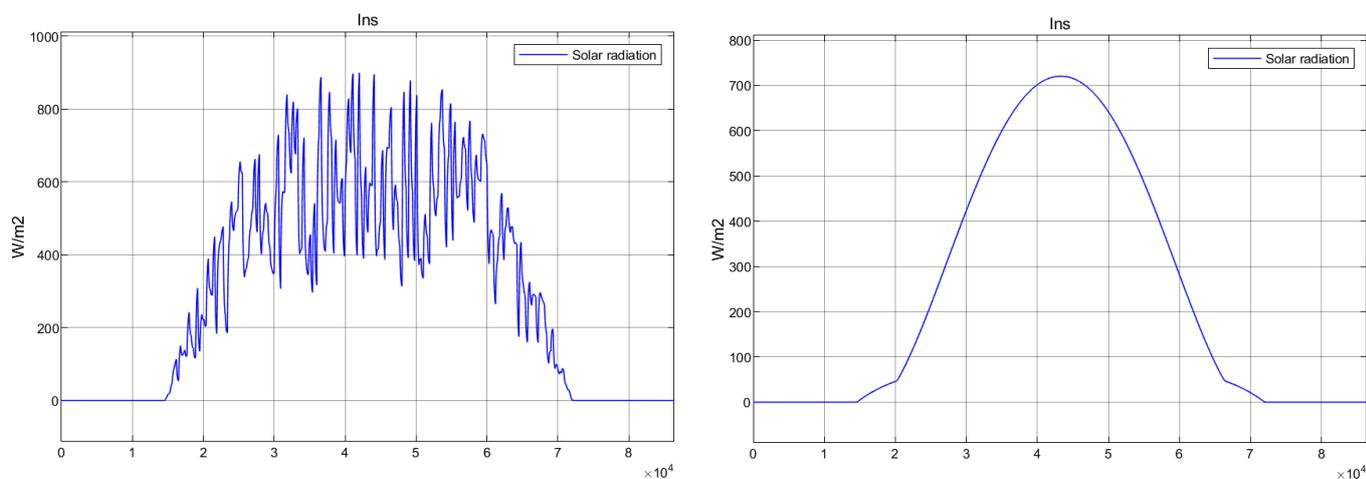


Рисунок 20 – Графики прихода солнечной радиации

Модель была сформирована в подсистему с возможностью изменения входных параметров для расчёта величины прихода радиации на любой местности, а также для любого дня года. Наличие возможности установления режима работы солнечного трекера позволяет оценить его эффективность в заданных климатических условиях.

### 3.2. Суточный ход температуры воздуха.

Результатом моделирования является определение изменения температуры воздуха в течение суток, которая оказывает влияние на генерацию электроэнергии. В течении суток температура воздуха изменяется по синусоидальной кривой.

Модель суточного хода температуры позволяет определить динамику изменения температуры в течение любого дня года по 3 входным параметрам: среднесуточной температуре воздуха; суточной амплитуде температуры воздуха; местное время максимума температуры. Данные о погоде взяты из [29]. На этом сайте представлена информация о погоде за каждый день начиная с августа 2016. Данные о температуре воздуха были определены по результатам анализа каждого конкретного дня на протяжении нескольких лет, то есть средние по результатам многолетних наблюдений.

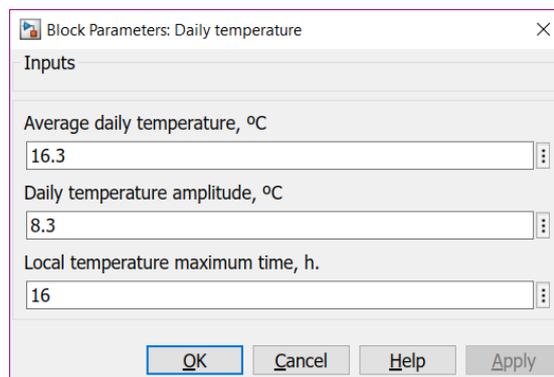


Рисунок 21 – Блок ввода данных

В соответствии с формулой (14) производится моделирование. Формулами произведён перевод часов в радианы, исходя из соотношения что за 24 часа Солнце преодолевает 360 градусов по дуге.

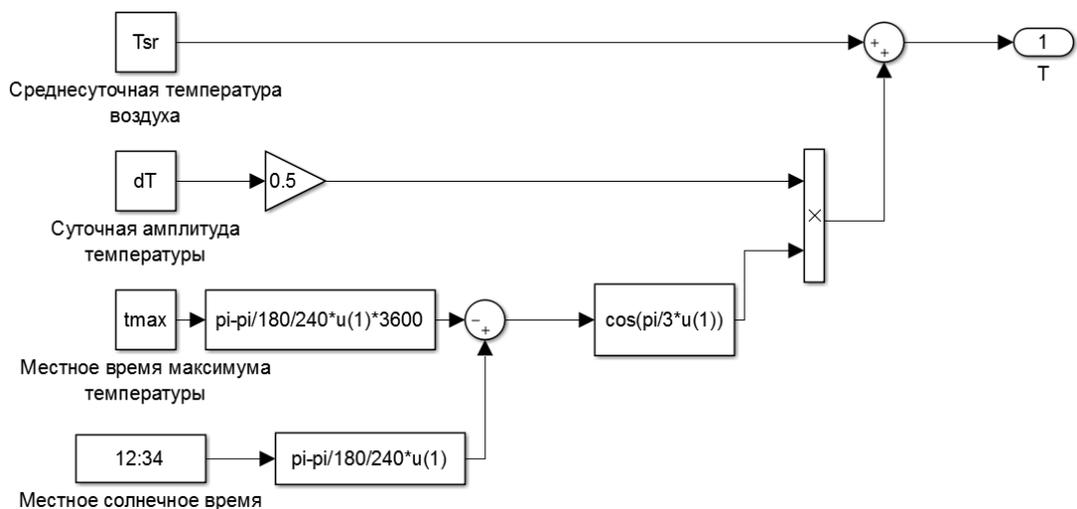


Рисунок 22 – Модель суточного хода температуры

Модель суточного хода температуры применима для любого дня года и любого населенного пункта с использованием статистических данных метеонаблюдений близлежащей метеостанции. Модель реализована в виде подсистемы и позволяет получить временную зависимость вариации температуры воздуха для рассматриваемого дня года.

### 3.3. Модель температуры поверхности фотоэлектрического модуля.

Результатом моделирования этой подсистемы является определение температуры поверхности ФМ. Её определение в каждый момент времени невозможно теоретическими методами, поэтому для моделирования используется эмпирическая формула (15). Данные о скорости ветра взяты средние для месяца из [29]. Она задаётся средней для заданного района в рассматриваемом месяце, уровень солнечной радиации приходит из подсистемы солнечной радиации, а температура воздуха приходит из модели суточного хода температуры.

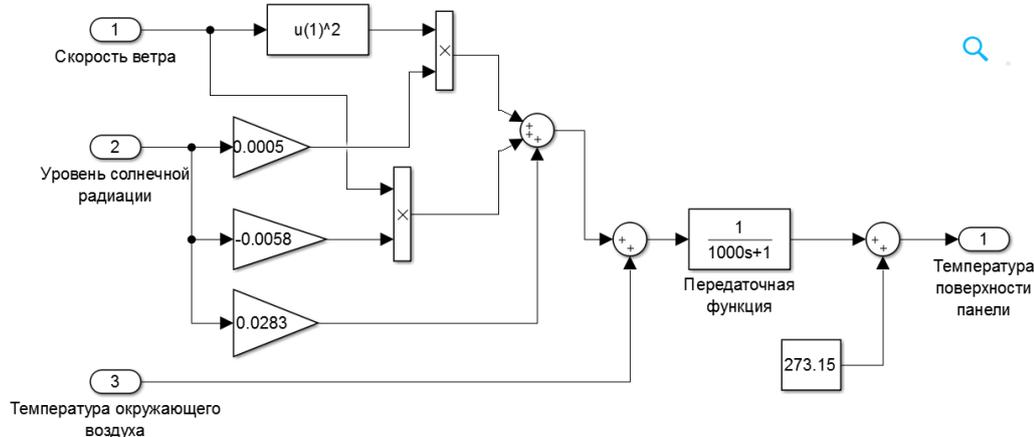


Рисунок 23 – Модель температуры поверхности ФМ

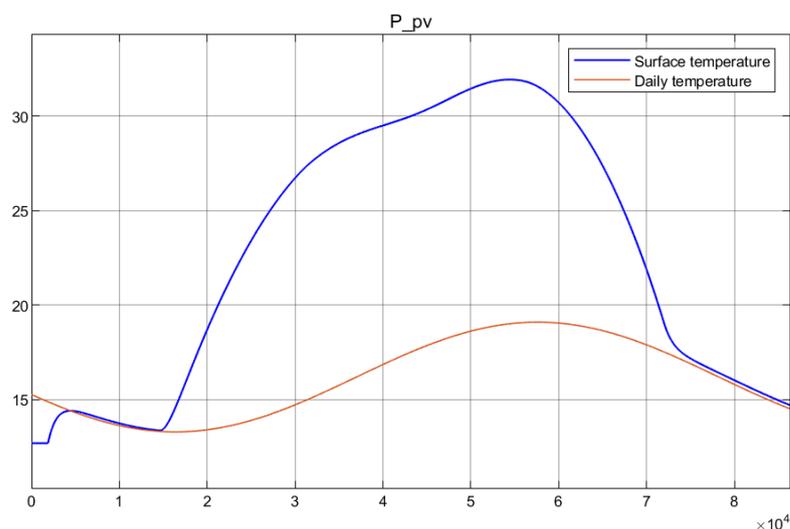


Рисунок 24 – Графики изменения температуры воздуха и поверхности ФМ

Скорость ветра задаётся блоком «Constant» и принимается величиной постоянной на протяжении всего моделирования. В следствие наличия инерции в тепловых переходных процессах, в состав модели была включена передаточная функция. Температура переводится в кельвины последним действием, т.е. дальше эта величина подаётся в блок солнечной панели для участия в дальнейших математических операциях.

### 3.4. Солнечная батарея.

Результатом моделирования солнечной панели является выходная мощность, которую СБ выдаёт при определённых условиях эксплуатации. Модель позволяет проанализировать эффективность использования и рассчитать экономическую выгодность различных типов батарей (монокристаллические и поликристаллические), прогнозировать выработку электроэнергии и анализировать рабочие режимы фотоэлектрических систем. Компьютерное моделирование осуществляется по формулам (16) – (18).

Начальными данными являются данные технической спецификации отдельно взятой панели, такие как: температурный коэффициент напряжения холостого хода; температурный коэффициента тока короткого замыкания; число фотомодулей в батарее; напряжение в точке максимальной мощности;

ток в точке максимальной мощности; напряжение холостого хода; ток короткого замыкания.

Параметры фотоэлектрического модуля:	
Напряжение холостого хода, В	49.03
Ток короткого замыкания, А	9.44
Напряжение в точке максимальной мощности, В	40.27
Ток в точке максимальной мощности, А	9.44
Температурный коэффициент напряжения XX, В/К	-0.186
Температурный коэффициент тока КЗ, А/К	0.00585
Количество модулей в батарее	46

Рисунок 25 – Блок ввода данных

Величина выходной мощности солнечной батареи зависит от уровня солнечной радиации, которая приходит в блок СБ из блока моделирования радиации, и температуры поверхности ФМ, чем выше значение которой, тем ниже мощность, отдаваемая потребителю.

Входными данными из других блоков служат солнечная радиация и температура поверхности фотоэлектрического модуля. Из  $T_{FM}$  вычитается 298,15 из-за перевода этой величины в кельвины в своём блоке, а также учёта, что нормальные условия для температуры окружающего воздуха составляют  $25^{\circ}\text{C}$ . Получается, что эта величина отвечает за определение того, на сколько градусов температура поверхности ФМ выше нормы.

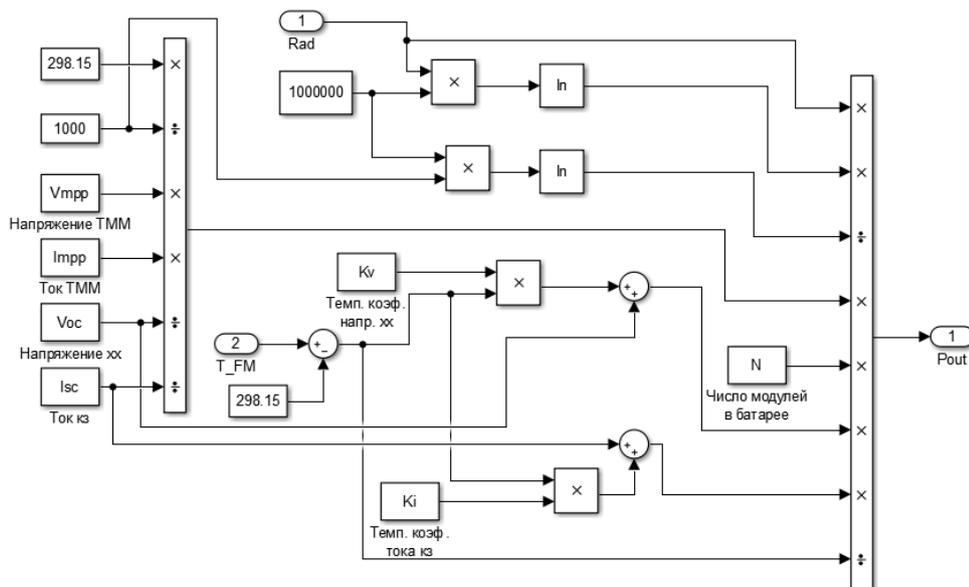


Рисунок 26 – Модель солнечной батареи

Для демонстрации работоспособности блока был выбран летний день, так как именно летом при высокой температуре воздуха отображена зависимость температура поверхности ФМ и выходной мощности.

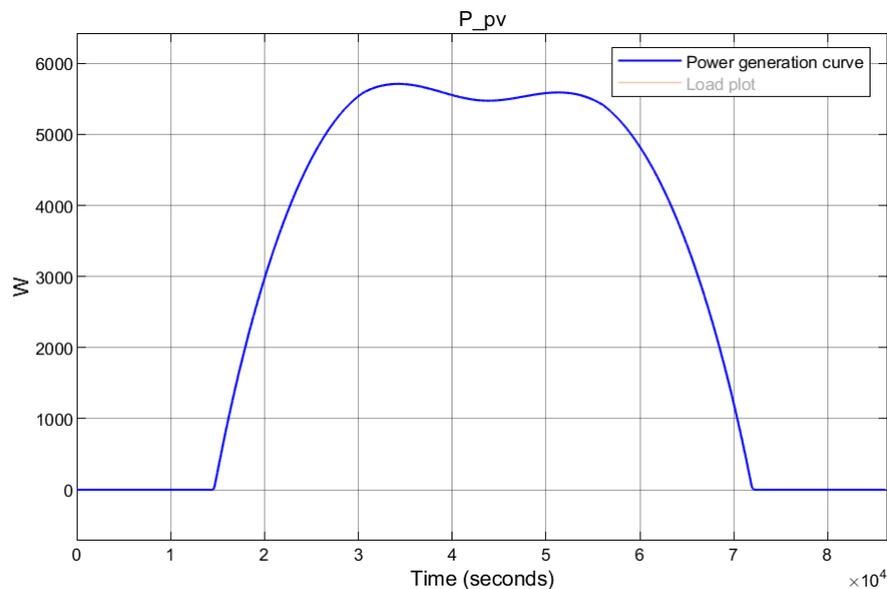


Рисунок 27 – График генерации ЭЭ

На рисунке 27 видно, что кривая на определенном временном интервале (от 2.9 до 5.2 ксек) ограничена в генерации. Объясняется это Рисунком 24 на котором на этом же временном интервале температура поверхности ФМ превосходит 25 °С.

### 3.5. Батарея аккумуляторная.

Для моделирования режима работы аккумуляторной батареи была использована упрощенная формула (19.1).

Исходными данными являются: номинальная ёмкость батареи, Ач; остаточная ёмкость батареи, %; постоянное напряжение батареи, В; внутреннее сопротивление батареи, Ом; напряжение поляризации, В.

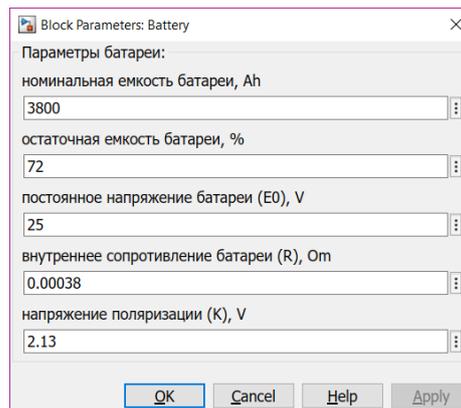


Рисунок 28 – Блок ввода данных

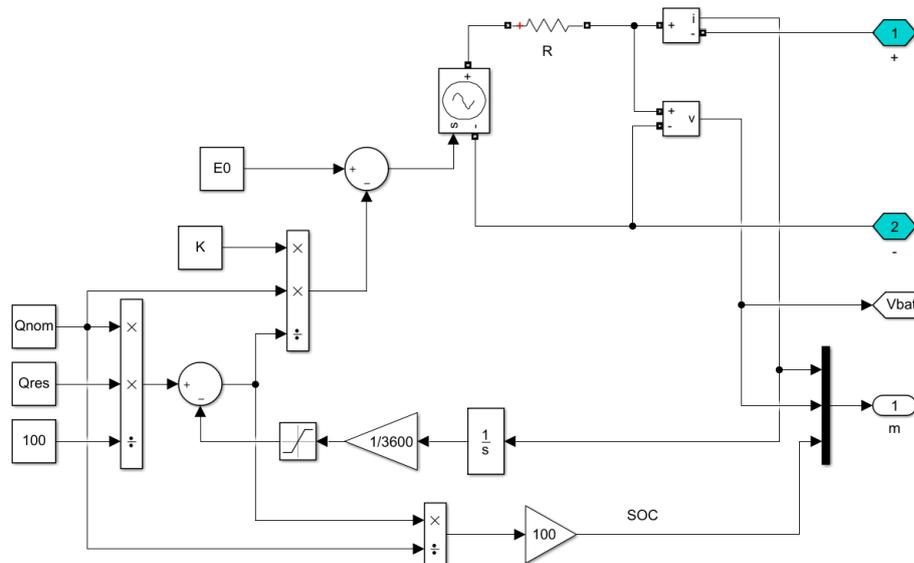


Рисунок 29 – Модель АКБ

Схема управления блоком Controlled Voltage Source реализует формулу (19). В зависимости от управляющего сигнала формируется пропорциональная величина напряжения, которая после учёта внутренних потерь, определяется как напряжение на выходных клеммах АКБ ( $V_{batt}$ ). В

зависимости от полярности приходящего постоянного тока из клемм 1 и 2, модель определяет: заряжается АКБ или разряжается, что отображается в величине ёмкости, т.е. SOC.

### 3.6. Модели преобразователей.

В принятой схеме построения ФЭС используются два типа силовых полупроводниковых преобразователей: преобразователь постоянного напряжения и выходной инвертор. Для исследования энергетических характеристик ФЭС построены «упрощенные» энергетические модели преобразователей на базе идеальных источников тока и напряжения.

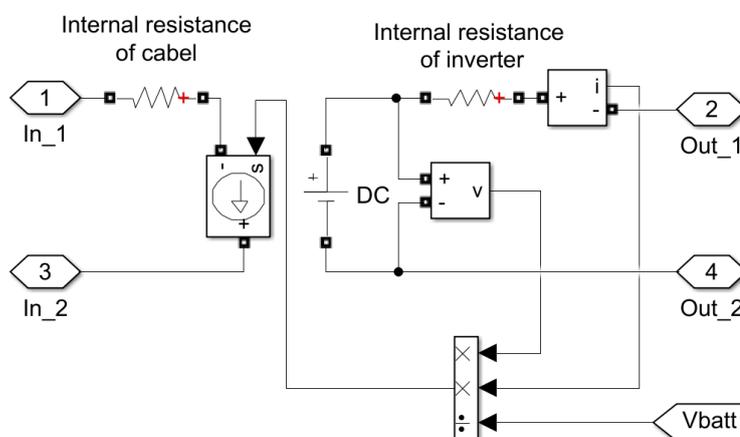


Рисунок 30 – Инвертор

Идеальный источник постоянного напряжения DC подключен к силовым выводам 2 и 4 через последовательное активное сопротивление, обеспечивающее учет внутренних потерь в инверторе. Измерительные трансформаторы тока и напряжения в вторичной цепи инвертора обеспечивают расчет потребляемой нагрузкой активной мощности и вычисления текущих значений тока, который необходим нагрузке. Ток во вторичной цепи определяется величиной нагрузки (и повторяет её форму), которая соединена с инвертором через клеммы 2 и 4. Ток от нагрузки поступает на вход управления источника тока, и он генерирует пропорциональный ток в цепи управления АКБ. Именно в этой цепи происходит вычитание токов от нагрузки и от СБ, в результате чего этот

разностный ток подаётся на клеммы батареи. И в зависимости от величин токов определяется, заряжается батарея или разряжается и на какую величину. Для учета потерь в соединительном кабеле от АБ во входную цепь инвертора включено активное сопротивление  $R_{pr}$ .

Аналогичным образом построена модель преобразователя постоянного напряжения.

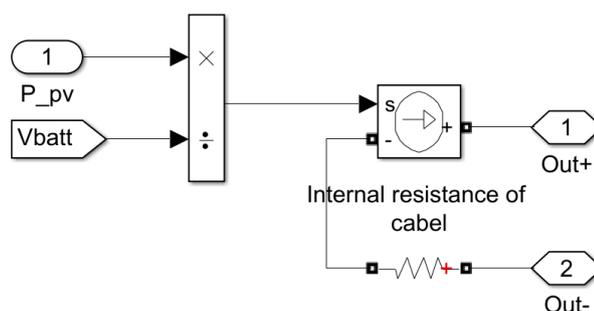


Рисунок 31 – Конвертер постоянного тока

Выходная мощность от СБ генерирует пропорциональный ток в цепи управления АКБ и определяет режим работы автономной ФЭС. Вычислительные тесты моделей преобразователей подтвердили их работоспособность в пределах возможного диапазона изменения входных и выходных параметров.

### 3.7. Модель нагрузки.

Можель нагрузки в данной работе задается через блок Signal Builder, в котором в долях от единицы указывается нагрузка в каждый момент времени. Используются типовые графика нагрузки по активной мощности для выбранного типа потребителя.

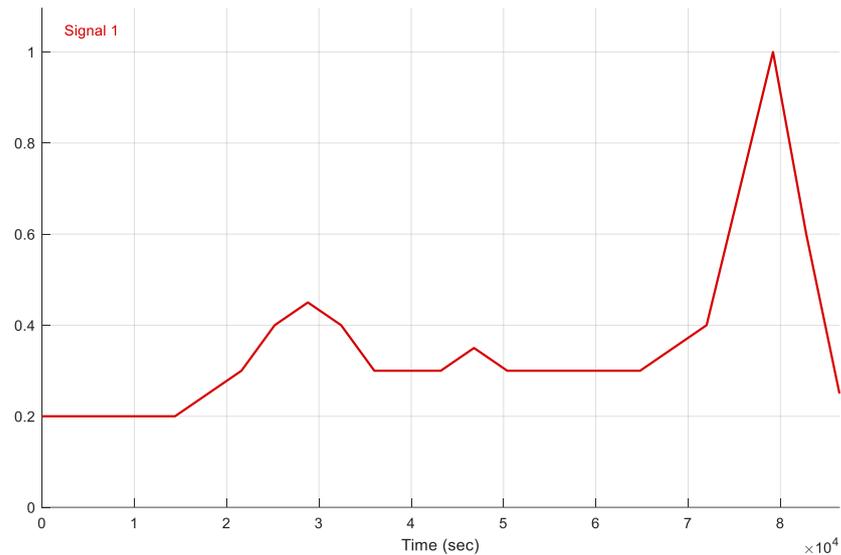


Рисунок 32 – Типовой суточный график потребления в Simulink

Каждую секунду, новое выходное значение из Signal Builder умножается на максимальную мощность нагрузки для данного потребителя, а затем поступает в подсистему «Нагрузка».

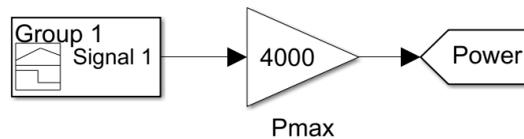


Рисунок 33 – Модель потребляемой мощности

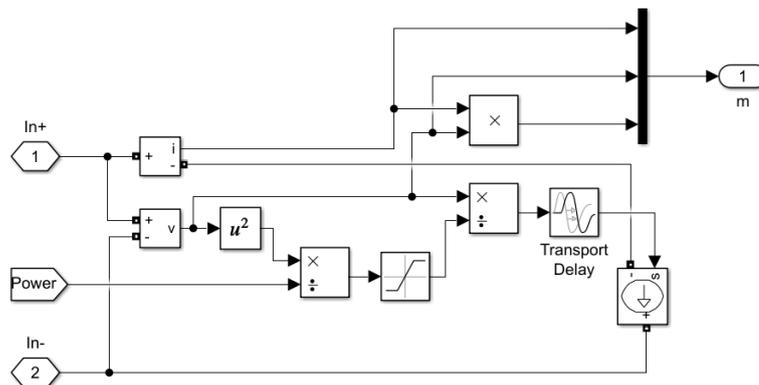


Рисунок 34 – Модель нагрузки

В модели реализован принцип обратной связи и для учёта пошаговости моделирования был включен блок задержки сигнала, в результате чего на каждом новом шагу учитывается прошлое состояние системы. Сигнал от

нагрузки (Power) изменяет ток нагрузки на следующем шагу моделирования на величину пропорциональную этому сигналу. Далее этот ток поступает в инвертор, на клеммы 2 и 4.

Собранная модель автономной ФЭС в программном комплексе MatLab Simulink имеет следующий вид:

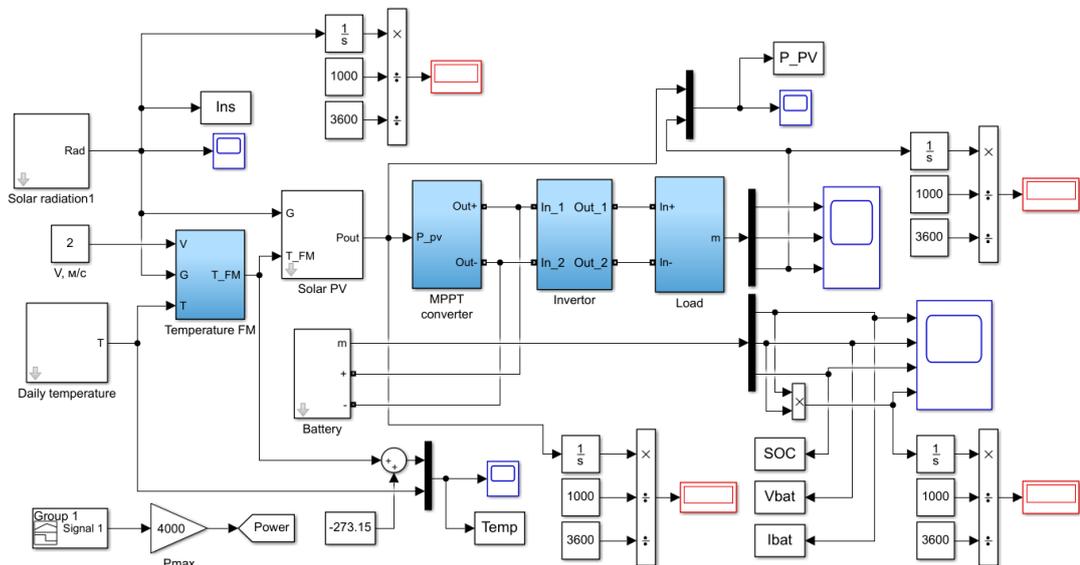


Рисунок 35 – Модель автономной ФЭС

Вывод: в четвёртой части была реализована модель автономной ФЭС в программном комплексе MatLab Simulink. Модель каждой составляющей была реализована в виде подсистем, что позволяет создать систему требуемой конфигурации. В модель были добавлены осциллограммы для графического наблюдения происходящих внутри процессов – для солнечной радиации, температуры воздуха и поверхности ФМ, тока, напряжения, мощности и SOC в АКБ, тока, мощности и напряжения нагрузки, а также процессов генерации и потребления электроэнергии. Также были добавлены дисплеи для определения величины солнечной радиации на квадратный метр, величин потребляемой и генерируемой энергии, а также величины изменения энергии в АКБ. По результатам анализа всех указанных блоков и будет сделан вывод о режимах работы выбранной ФЭС.

## Часть 4. Моделирование режимов работы

### 4.1. Выбор параметров ФЭС.

Для апробации модели необходимо определить место установки фотоэлектрической системы, так как генерируемая энергия зависит от погодных условий местности и уровня солнечной энергии. Согласно карте солнечной активности на территории России самыми солнечными являются регионы Дальнего Востока и Краснодарский край. В России преобладает умеренный климатический пояс, при этом Краснодар располагается в области умеренного континентального климата, а Дальний Восток в области мусонного климата. В Хабаровске число солнечных дней в год намного больше, чем в большинстве городов (300 солнечных дней против 100 в Москве и Санкт-Петербурге и 220 в Краснодаре). Причина этого в преобладании Сибирского зимнего антициклона, благодаря которому с ноября по март в городе сухой и морозный воздух с ясной и солнечной погодой. Низкая температура (ниже чем в Краснодаре) служит естественной системой охлаждения, что в свою очередь влияет на напряжение холостого хода фотоэлемента и как следствие на его эффективность. Летом же здесь наблюдается более высокий уровень солнечной инсоляции, однако появление облачности и отсутствие снега наоборот способствуют меньшей выработки, нежели зимой. Выбор места установки ФЭС в Хабаровске выглядит наилучшим вариантом, так как в следствие погодных особенностей разница в генерации между зимой и летом отличается на меньшую величину, чем в других районах страны. В качестве объекта электроснабжения выбран жилой сельский дом с координатами  $48.6^{\circ}$  северной широты и  $135.6^{\circ}$  восточной долготы в селе Анастасьевка на расстоянии в 30 км от Хабаровска.

Автономная фотоэлектрическая станция должна круглогодично бесперебойно обеспечивать потребителя электроэнергией. Поэтому выбор её параметров отстраивается от самых худших условий – самого короткого дня

(21 декабря). На Рисунке 36 представлены типовые суточные графики нагрузки активной мощности для сельской местности в зависимости от сезона.

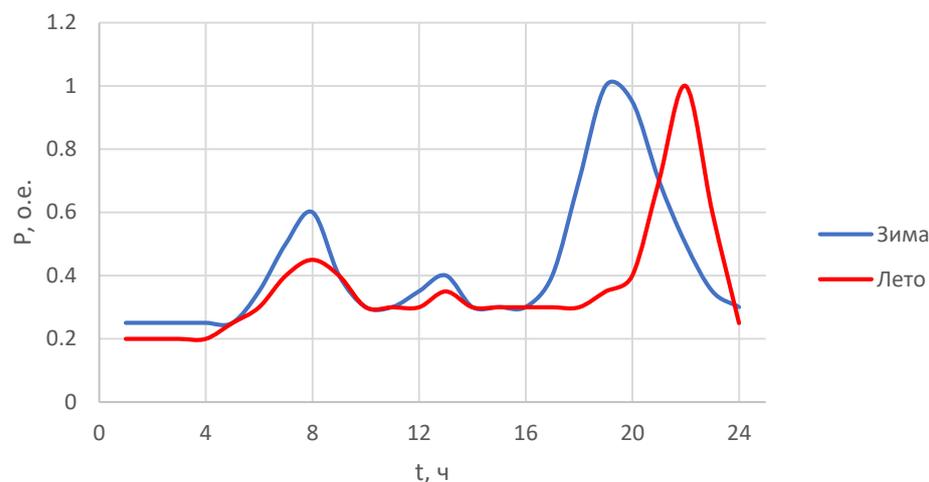


Рисунок 36 – Типовые графики нагрузки по сезонам [30]

График представлен в относительных единицах для каждого сезона, однако расчётные нагрузки для летнего и зимнего дня отличаются. При переводе графика из относительных единиц в именные необходимо для каждого месяца учесть коэффициенты сезонности, приведенные в Таблице 2. Коэффициенты даны относительно годовой максимальной активной нагрузки.

Таблица 2. Коэффициенты сезонности для суточного графика активных нагрузок сельских домов. [30]

Месяц	$K_p$
Январь	1.0
Февраль	1.0
Март	0.8
Апрель	0.8
Май	0.8
Июнь	0.7
Июль	0.7
Август	0.7
Сентябрь	0.9
Октябрь	0.9
Ноябрь	0.9
Декабрь	1

Из Таблицы 2 видно, что нагрузка в июне на 30% меньше нагрузки в декабре. Для вновь электрифицируемых населенных пунктов, а также при отсутствии сведений об электропотреблении домов, расчётная нагрузка на вводах в жилые дома без газификации принимается равным 5 кВт [30]. Для лета эта величина равна 3.5 кВт. График нагрузки в именованных единицах представлен на Рисунке 37.

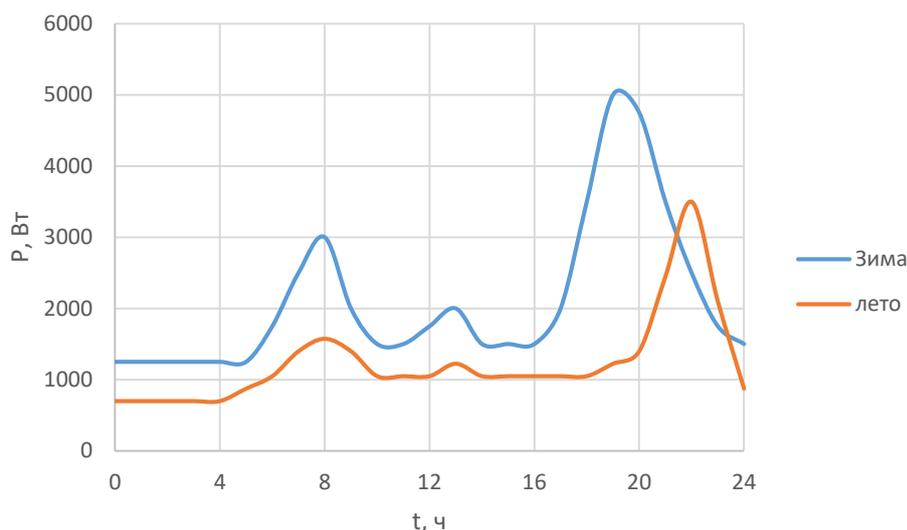


Рисунок 37 – Графики нагрузки по сезонам

С помощью разработанного программного комплекса было определено, что в типичный летний день потребляется 30.19 кВтч электроэнергии. В типичный зимний день – 51.13 кВтч.

Для соблюдения энергетического баланса и удовлетворения спроса со стороны потребителя необходимо, чтобы солнечная батарея за сутки генерировала такую же мощность. Для этого необходимо выбрать число фотоэлектрических модулей и их схему соединения. Были выбраны панели от фирмы JA Solar 72-cell mono PERC Double Glass Module JAM72D00-380/PR. Эти двухстекольные модули питаются от PERC-ячеек для обеспечения высокой выходной мощности с более высокой выработкой энергии в условиях малой освещенности. Двухстекольные модули хорошо работают в агрессивной окружающей среде - не только в пустынях, где защищают от песка, но также

и в типичных климатических условиях выбранного местоположение – снегом и частым опусканием температуры воздуха ниже 0 градусов. Большим плюсом является срок службы до 30 лет. Данные спецификации сведены в Таблицу 3.

Таблица 3. Спецификация для JAM72D00-380/PR [31].

Номинальная мощность	380 Вт
Максимальное напряжение	40.27 В
Максимальный ток	9.44 А
Напряжение холостого хода	49.03 В
Ток короткого замыкания	9.91 А
Температурный коэффициент $I_{кз} (\alpha_{I_{кз}})$	$+0.00585 \frac{A}{K}$
Температурный коэффициент $V_{хх} (\beta_{V_{хх}})$	$-0.186 \frac{B}{K}$
Число ячеек	72 (6x12)
Размеры с рамкой	1,968 x 992 x 25мм
Цена	15,000 руб.

Максимальная эффективность солнечной батареи достигается при перпендикулярном положении поверхности к солнечным лучам. В зависимости от сезонности оптимальный угол наклона панели меняется. Зимой он принимается равным на 10-20 градусов больше, чем широта установки ФЭС, а летом на 10 – 20 градусов меньше.

Модель в MatLab Simulink позволяет определить величину мощности, генерируемую одной солнечной панелью. В качестве исходных данных вбиваем параметры выбранного ФМ, параметров для определения величины приходящей солнечной радиации, а также данные о погоде, которые сведены в Таблицу 4.

Таблица 4. Исходные данные.

Широта	48.6 град.
Солнечный трекер	азимутальный
Угол наклона	60 град.
Напряжение холостого хода	49.03 В
Ток короткого замыкания	9.91 А

Таблица 4. Исходные данные. (продолжение)

Температурный коэффициент тока короткого замыкания	$+0.00585 \frac{A}{K}$
Температурный коэффициент напряжения холостого хода	$-0.186 \frac{B}{K}$
Напряжение максимума мощности	40.27 В
Ток максимума мощности	9.44 А
Местное время максимума температуры	16 ч
Номер дня	355
Индекс прозрачности атмосферы	0.55
Альbedo земной поверхности	0.26
Средняя дневная температура воздуха, °С	-16.2
Средняя дневная амплитуда температуры воздуха, °С	5.8
Скорость ветра, м/с	3.1
Количество фотомодулей	1

По результатам моделирования одна панель зимой генерирует 1.09 кВтч в день. Учитывая потребляемую энергию (51.13 кВтч), необходимое число солнечных панелей для автономной работы равно

$$N_{\text{сол.пан.}} = \frac{E_{\text{потр}}}{E_{\text{ген0}}} = \frac{51.13}{1.09} \approx 48 \text{ штук.}$$

Необходимо определить максимальную мощность, которую могут генерировать 48 панелей. Номинальная мощность панели равна 380 Вт при  $1000 \text{ Вт/м}^2$  и температуре поверхности  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Однако в климатических условиях рассматриваемой местности освещённость и температура значительно отличаются. В соответствие с ватт-вольтовой характеристикой, представленной на Рисунке 38, оценивается максимальная мощность СБ. Однако в разработанном программном комплексе MatLab есть возможность определить величину максимальной генерируемой мощности в любой день года с высокой точностью. Максимальная мощность летом 21 июня определяется из Рисунка 39.

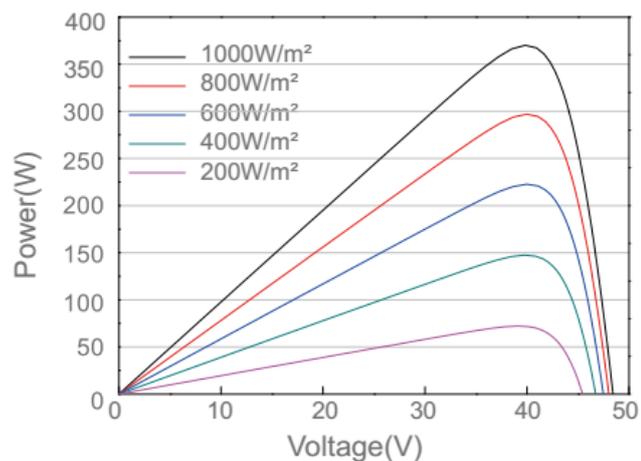


Рисунок 38 – Ватт-вольтовая характеристика JAM72D00-380/PR

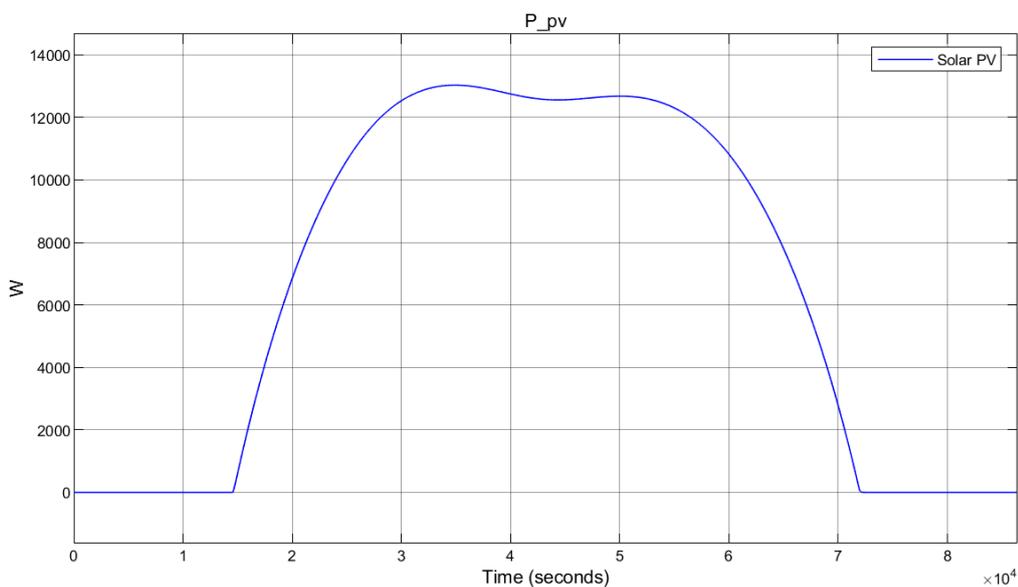


Рисунок 39 – График генерации ЭЭ 48 панелями 21 июня

Итого максимально возможная сумарная генерируемая мощность ФМ равна 13 кВт.

По максимальной мощности возможно выбрать контроллер заряда. Фирма МАП Энергия предлагает контроллер КЭС DOMINATOR MPPT 250/600 с характеристиками, приведёнными в Таблице 5.

Таблица 5. Характеристики контроллера. [32]

Макс. ток	60 А
Напряжение АКБ	12/24/36/48/96 В
Максимальное рабочее напряжение PV массива	233 В
Максимальное напряжение разомкнутого PV массива	250 В
Максимальная мощность PV массива	12В: 810Вт/ 24В: 1650Вт/ 48В: 3300Вт/ 96В: 6600Вт
Тип используемых аккумуляторов	Gel, AGM
Цена	49,900 руб.

В связи с тем, что территориально солнечные панели и контроллер заряда расположены на большом расстоянии друг от друга, то передача электроэнергии по соединительному кабелю должна производиться при максимально возможном напряжении. Это условие определяет последовательно-параллельное соединение солнечных панелей. Согласно Таблице 4 напряжение открытой цепи равно 49 В. Из Таблицы 5 максимальное напряжение разомкнутого контура для контроллера 250 В. Однако, согласно паспорту контроллера, напряжение не должно превышать 250 В ни при каких условиях, и рекомендуется обратить внимание, что при низких температурах напряжение открытого контура солнечных панелей увеличивается на 20-25%, поэтому принято построить СБ из цепочки 4 последовательных и 12 параллельных ФМ.

Уровень напряжения АКБ отстраивается от выбранного контроллера и выбирается по максимальной мощности PV массива. Максимально генерируемая мощность 13 кВт, а максимальная мощность контроллера равняется 6.6 кВт. Согласно условиям эксплуатации, если система содержит несколько контроллеров, то все значения параметров АКБ должны быть одинаковыми и каждый контроллер должен быть подключен на свой независимый массив солнечных панелей. Беря во внимание, что фирма МАП Энергия выпускает и контроллеры, и инверторы, то лучше выбрать

электронику одного производителя, поэтому необходимо учесть их совместимость между собой. Энергия не выпускает инверторы на 96 В, поэтому была выбрана система: ставятся четыре контроллера, к каждому из которых подключены 12 ФМ, а напряжение АКБ принимается равным 48 В.

Была выбрана аккумуляторная батарея фирмы Delta Battery GX 12 – 200. Это гелевые аккумуляторы устойчивые к глубоким разрядам и имеющие большое число циклов заряда/разряда, рекомендованные для применения в автономных энергосистемах, а также совместно с системами на базе альтернативных источников энергии [33].

Таблица 6. Спецификация АКБ.

Номинальная емкость при 10-часовом разряде	200 Ач
Номинальное напряжение	12 В
Внутреннее сопротивление батареи	0.0036 Ом
Рабочий диапазон температур	от -20 <sup>0</sup> С до 60 <sup>0</sup> С
Вес	65 кг
Цена	48,600 руб.

Число последовательно включенных батарей равняется четырем, а параллельных соединений определяется из соотношения, что за время эксплуатации АКБ не должна разряжаться больше чем на 60%. Через функцию Solver в MS Excel была решена следующая задача оптимизации по оптимальному выбору АКБ.

$$4 \cdot N_{АКБ} P_{АКБ} \rightarrow \min$$

$$SOC_{24} \geq SOC_1$$

$$\frac{Q_0 N_{АКБ} - \frac{E_{ном} - \int P_1 dt \cdot N_{сол.н.}}{U}}{Q_{ном} N_{АКБ}} \leq 1$$

$$\frac{Q_0 N_{АКБ} - \frac{E_{ном} - \int P_1 dt \cdot N_{сол.н.}}{U}}{Q_{ном} N_{АКБ}} \geq 0.6$$

$$N_{АКБ} \geq 0$$

$$N_{АКБ} = \text{integer}$$

В результате, минимальная ёмкость АКБ, удовлетворяющая заданным ограничениям равняется 2000 Ач, т.е. 10 параллельных ветвей. Итого для бесперебойного электроснабжения необходимо 40 АКБ.

Нагрузка подключается к СЭС через инвертор, поэтому его номинальная мощность выбирается по мощности потребителя. По Рисунку 37 был выбран инвертор МАП HYBRID-48-6 производства MicroArt.

Таблица 7. Характеристика инвертора МАП-HYBRID-48-6 [34].

Максимальная мощность	9 кВт
Пиковая мощность	12 кВт
Номинальная мощность	6 кВт
Входное напряжение	48 В
Выходное напряжение	220 В
Частота	50 Гц
Цена	93,000 руб

Также для слежения за Солнцем выбран солнечный трекер ED-1500 российского производителя “EDS Group” со сроком службы 25 лет. Для принятого числа ФМ необходимо 4 трекера, по одному на каждый контроллер.

Таблица 8. Характеристика солнечного трекера.

Число модулей	12
Мощность ротора	5 Вт x 1
Дневное энергопотребление	$\leq 0.01$ кВтч
Угол	Слева-направо: с $-75^\circ$ до $+75^\circ$
Максимальная сила ветра	170 км/ч
Цена	197,000 руб.

Выбрав все компоненты ФЭС и определившись с их параметрами, возможно начать исследование энергетического баланса автономной системы.

#### 4.2. Моделирование режимов работы.

Опишем результаты применения модели. Для исследования энергетического баланса будет проведено моделирование режимов работы для типичного зимнего дня – 21 декабря и на его анализе будет сделан вывод об

удовлетворении данной установки требованиям по бесперебойности электроснабжения автономной установки. Исходные данные о моделировании представлены в Таблице 4. Число солнечных панелей – 48.

Первое моделирование. Зима. 21 декабря. За время моделирования было сгенерировано 51.86 кВтч, а потреблено 51.12 кВтч. Батарея была запитана на 0.61 кВтч электроэнергии. Разница в сумарном потреблении и генерации объясняется потерями в ФЭС. Рассмотрим процессы внутри автономной системы.

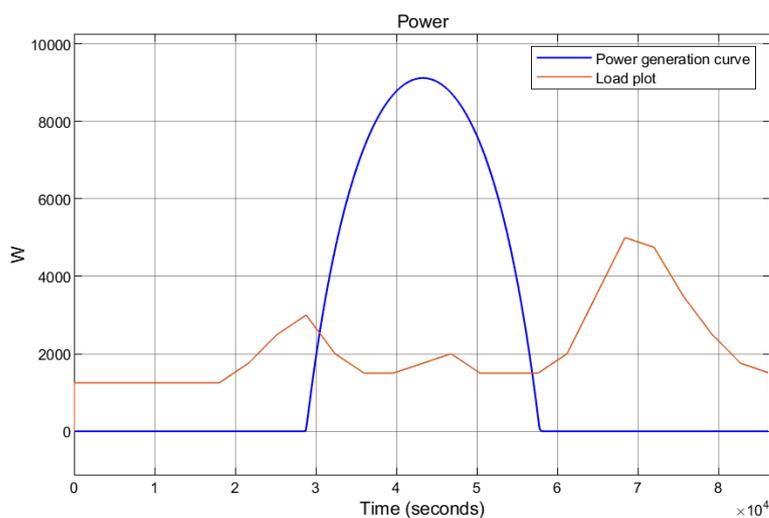


Рисунок 40 – Графики нагрузки и потребления

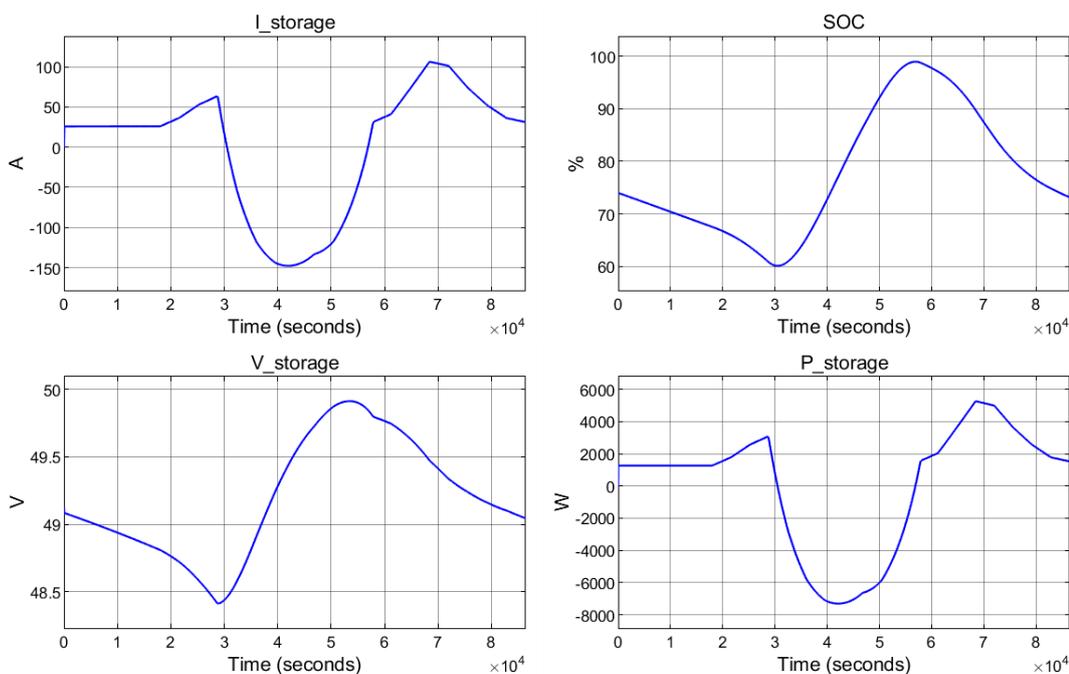


Рисунок 41 – Графики процессов внутри АКБ

Во-первых стоит отметить, что кривая тока повторяет форму мощности, потому что разница между ними только на величину напряжения на выходных клеммах батареи, которая примерно постоянна на протяжении всего дня. Для понимания графиков зарядки/разрядки батареи необходимо сравнить их с графиками генерации и потребления.

До восхода Солнца (до 28 ксек) график тока АКБ повторяет график нагрузки, т.к. потребитель питается лишь от батареи и увеличение тока для нагрузки неизбежно приводит к увеличению тока в батарее. После восхода Солнца, когда потребление всё ещё превосходит генерацию (от 28 до 31 ксек), энергия от батареи всё также потребляется, но значительно меньше, т.к. часть потребления покрывается от ФЭС. Этим объясняется уменьшение тока в батарее. После 31 ксек солнечные панели начинают генерировать больше, чем потребляется, и с этого момента излишек начинает накапливаться в батареях, и на графике это отображено в виде перехода тока через 0 и дальнейшем его понижением. Заряд в батарее начинает накапливаться, что отображается в виде возрастания SOC. При уменьшении солнечной инсоляции уменьшается и ток, заряжающий батарею.

Во второй точке пересечения графиков генерации и потребления (56 ксек) происходят процессы, описанные до точки 31 ксек. После прекращения генерации (57 ксек) наступает пик нагрузки, который снабжается лишь за счёт АКБ, которая обязана его покрыть, не опускаясь ниже уровня заряда в начале моделирования. Ввиду зависимости генерации от стохастических внешних факторов и того, что 21 декабря самый короткий солнечный день в году, то вариации SOC в пределах нескольких процентов считается вариацией нормы. На Рисунке 42 представлены графики процессов на нагрузке.

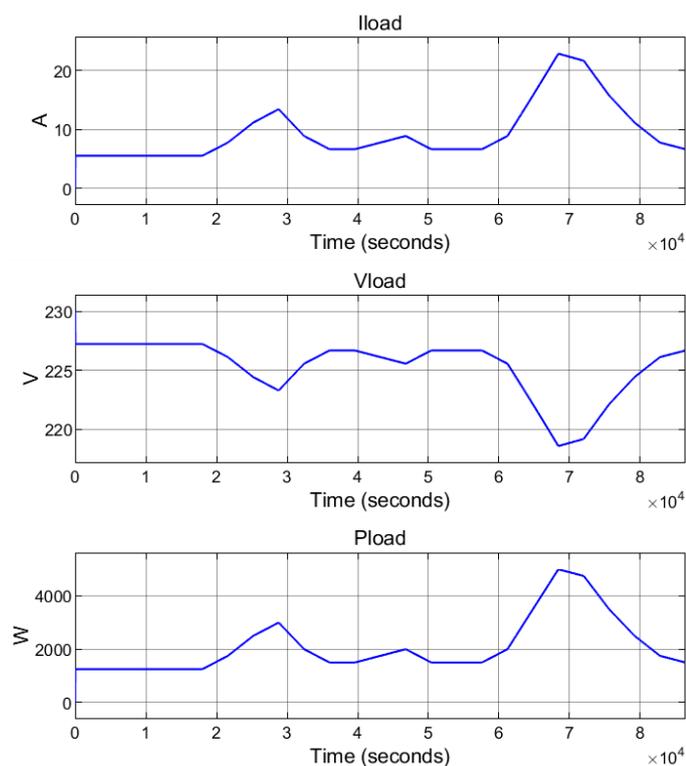


Рисунок 42 – Графики потребителя

В результате проведённого моделирования можно сделать вывод, что выбранная конфигурация автономной ФЭС обеспечивает бесперебойное электроснабжение в течение зимы. А так как зима является самым суровым временем эксплуатации ФЭС, то бесперебойность питания зимой является обязательным и единственным критерием надёжности автономной СЭС.

#### 4.3. Альтернативные варианты.

Рассмотренный вариант автономной СЭС на базе только ВИЭ и аккумуляторных батарей имеет ряд недостатков. Во-первых, из-за полного расхождения годовых максимумов генерации и потребления электроэнергии, необходимо выбирать оборудование для самых тяжёлых условий, которые длятся лишь два месяца, а остальное время эксплуатации требует менее мощную конфигурацию СЭС, соответственно и более дешёвую. Во-вторых, дороговизна АКБ и их недолговечность способствуют уменьшению желания

иметь с ними дело. Процентное соотношение начальных инвестиций (3.74 млн. руб.) представлено на Рисунке 43.

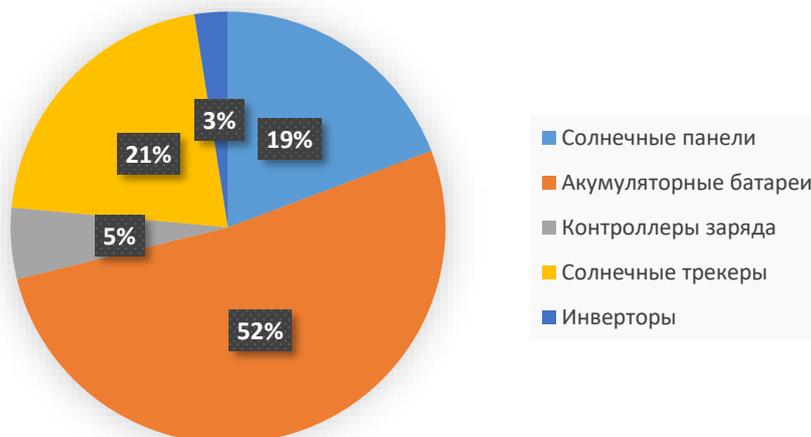


Рисунок 43 – Диграмма инвестиций

Можно избавиться от указанных недостатков путём добавления в систему дизель генератора. Это позволит уменьшить число солнечных панелей и АКБ, а образовавшуюся нехватку электроэнергии восполнить за счёт генератора. Так как он будет включаться в работу лишь несколько месяцев в году, то и срок его службы может составлять до 12 лет. Будут рассмотрены два случая: число панелей снижено до 36 и до 24 штук. Число АКБ уменьшается до 32 штук (1600 Ач) и до 20 штук (2000 Ач) соответственно. Нехватка электроэнергии будет покрываться от ДГ. Для каждого месяца каждого случая будет проведено моделирование и посчитан расход топлива, после чего будет сделана оценка экономических затрат. В качестве критериев экономической эффективности можно выделить стоимость 1 кВтч электроэнергии и годовые затраты на 1 кВт установленной мощности. Годовые затраты на 1 кВт определяется по выражению:

$$Z = \frac{P_n K + C}{P}; \quad (40)$$

где  $P$  – установленная мощность объекта электроснабжения, кВт;

$P_n = \frac{1}{T}$  - нормативный коэффициент рентабельности;

$T$  – экономический срок службы оборудования, лет;

$K$  – общие капиталовложения, руб;

$C$  – общие годовые эксплуатационные расходы, руб.

Общие капиталовложения считаются по формуле:

$$K = K_{уст} + K_{пр} + K_{стр} \quad (41)$$

где  $K_{уст}$  – стоимость оборудования, комплектующих, доставки, руб;

$K_{пр}$  – стоимость проектно-изыскательных работ, руб;

$K_{стр}$  – стоимость строительно-монтажных работ, руб.

Общегодовые эксплуатационные расходы:

$$C = C_{эск} + C_{рем} + C_{топ} + C_{д.топ} \quad (42)$$

где  $C_{эск}$  – стоимость эксплуатации, заработной платы персонала, руб;

$C_{рем}$  – стоимость ремонтных работ, хапчастей, руб;

$C_{топ}$  – стоимость топлива, руб;

$C_{д.топ}$  – стоимость доставки топлива, руб.

Себестоимость 1 кВтч электроэнергии определяется по выражению:

$$C_{эл} = \frac{P_n K + C}{W} \quad (43)$$

где  $W$  – годовое потребление энергии, кВтч.

ДГ выбирается согласно максимальной мощности нагрузки +25%, т.е. примерно 6 кВт. Был выбран дизельный генератор Генератор ТСС SDG 6000ES3-2R с параметрами, сведёнными в Таблицу 9.

Таблица 9. Параметры ДГ ТСС SDG 6000ES3-2R. [35]

Номинальная мощность, кВт	6
Максимальная мощность, кВт	7.5
Напряжение, В	230/400
Расход топлива при 75% нагрузки, л/ч	2.6
Расход топлива при 100% нагрузки, л/ч	3
Цена, руб	78,000
Автономная работа на 75% без дозаправки, ч	5

Данные для моделирования каждого месяца сведены в таблицу 10.

Таблица 10. Данные для моделирования. (часть 1)

Входные данные	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
Номер дня	15	46	74	104	134	165
Индекс прозрачности атмосферы	0.60	0.66	0.63	0.53	0.50	0.48
Альbedo поверхности	0.31	0.36	0.32	0.14	0.13	0.15
Средняя температура воздуха	-14.6	-12.7	-4.8	6	15.5	16.3
Амплитуда температуры воздуха	2.9	6.4	4.6	9.6	14.4	8.3
Скорость ветра	2.7	2.5	2.5	2.8	2.5	2
Коэффициент сезонности нагрузки	1	1	0.8	0.8	0.8	0.7

Таблица 10. Данные для моделирования. (часть 2)

Входные данные	Июль	Август	Сент	Окт	Нояб	Дек
Номер дня	195	226	257	287	319	349
Индекс прозрачности атмосферы	0.45	0.45	0.51	0.50	0.56	0.56
Альbedo поверхности	0.15	0.14	0.12	0.1	0.2	0.26
Средняя температура воздуха	22.2	19.1	15.7	6.6	-4.9	-16.2
Амплитуда температуры воздуха	8	3.4	13.3	6	1.4	5.8
Скорость ветра	1.8	1.8	2.1	2.5	2.9	3.1
Коэффициент сезонности нагрузки	0.7	0.7	0.9	0.9	0.9	1

Второе моделирование. 36 солнечных панелей и 32 АКБ. Результаты моделирования для 15 числа каждого месяца сведены в таблицу 11.

Таблица 11. Результаты моделирования.

Месяц	Сгенерировано, кВтч	Потреблено, кВтч	Потреблено из АКБ, кВтч	Генерирует ДГ за месяц, кВтч
Сентябрь	84.00	46.01	-36.90	0
Октябрь	67.5	46.01	-20.40	0
Ноябрь	44.96	46.01	2.130	64
Декабрь	39.08	51.12	13.39	415
Январь	42.50	51.12	9.980	309
Февраль	56.65	51.12	-4.18	0
Март	75.83	40.90	-34.08	0

Отрицательная величина в колонке «Потребление из АКБ» указывает, что потреблено ЭЭ меньше, чем сгенерировано. При соблюдении энергетического баланса, в сутки генерируется столько же электроэнергии, сколько и потребляется. Поэтому ДГ должен работать только в те месяцы, когда для соблюдения баланса энергия берётся из АКБ, т.е. в ноябре, декабре и январе. Из динамики изменения чисел становится очевидно, что с апреля по август ДГ использоваться не будет. Суммарная генерируемая энергия ДГ равна 788 кВтч.

Третье моделирование. 24 солнечных панели и 20 АКБ. Результаты моделирования для 15 числа каждого месяца сведены в Таблицу 12.

Таблица 12. Результаты моделирования.

Месяц	Сгенерировано, кВтч	Потреблено, кВтч	Потреблено из АКБ, кВтч	Генерирует ДГ за месяц, кВтч
Сентябрь	56	46.01	-8.9	0
Октябрь	45	46.01	2.097	65
Ноябрь	29.98	46.01	17.12	514
Декабрь	26.06	51.12	26.42	819
Январь	28.33	51.12	24.14	748
Февраль	37.77	51.12	14.71	412
Март	50.55	40.9	-8.8	0

ДГ будет покрывать недостаток нагрузки с октября по февраль. Суммарная генерируемая энергия ДГ равна 2558 кВтч.

Таблица 13. Данные для оценки экономических характеристик.

Солнечная панель	15,000 руб/шт
Аккумуляторная батарея	48,600 руб/шт
Контроллер заряда	49,900 руб/шт
Солнечный трекер	197,000 руб/шт
Инвертор	93,000 руб/шт
Стоимость ДГ	78,000 руб/шт
Стоимость комплектующих	300,000 руб
Стоимость доставки оборудования	20,000 руб
Стоимость проектно-изыскательных работ	100,000 руб

Таблица 13. Данные для оценки экономических характеристик. (продолжение)

Стоимость строительно-монтажных работ	630,000 руб
Экономический срок службы проекта	20 лет
Экономический срок службы АКБ и электроники	10 лет
Стоимость литра топлива	45 руб
Стоимость доставки литра топлива	4 руб
Стоимость эксплуатации	50,000 руб
Стоимость ремонтных работ, запчастей	69,000 руб

Значения экономических показателей, используемых в формулах (40) – (43) сведены в Таблицу 13. Результаты расчётов для всех трёх моделирований сведены в Таблицу 14.

Таблица 14. Результаты оценки экономической эффективности.

Число ФМ	48	36	24
Число АКБ	40	32	20
Дизель генератор, кВт	0	6	6
Общие капиталовложения, млн. руб	7.0	5.8	4.0
Себестоимость 1 кВтч ЭЭ, руб	32.0	28.2	23.4
Годовые затраты на 1 кВт установленной мощности, руб	25.8	21.1	22.8

Диаграмма соотношения доли ВИЭ и основных экономических параметров представлена на Рисунке 44.

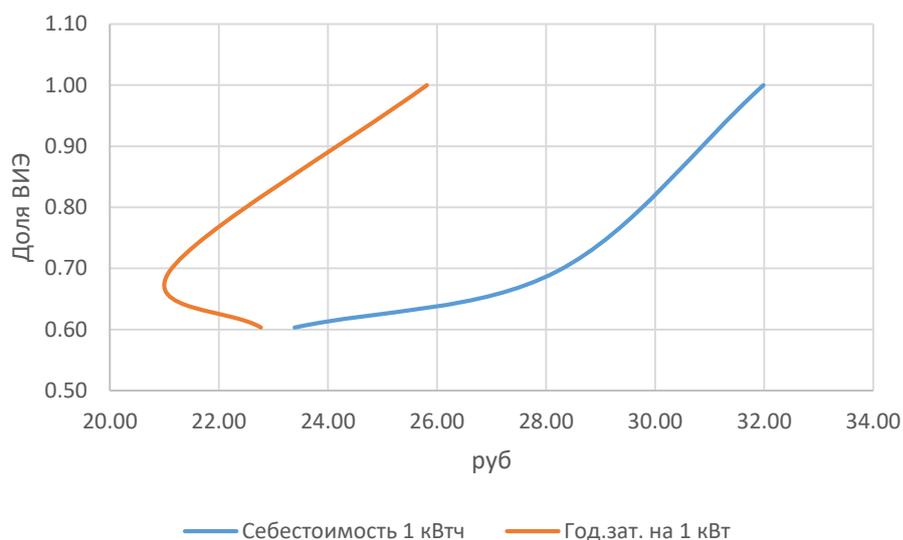


Рисунок 44 – Зависимость экономических показателей от доли ВИЭ

Из графиков зависимости можно сделать вывод, что экономически оптимальное соотношение доли ВИЭ к доли ДГ в составе гибридной автономной системе электроснабжения в заданных условиях эксплуатации примерно 2:1.

## Заключение.

Магистерская работа посвящена исследованию энергетического баланса в автономных системах электроснабжения на основе фотоэлектрических систем. Первая часть посвящена обзору нынешнего состояния ВИЭ в России и мире. Из докладов различных международных организаций можно сделать вывод о высоком росте доли солнечной энергетике в мире и о больших перспективах её дальнейшего развития с возможностью частичного вытеснения традиционных источников электроэнергии. Россия также развивает установки ВИЭ на основе ФЭС, с их помощью в основном решаются проблемы электроснабжения удалённых потребителей, к которым экономически необосновано прокладывать линии централизованного электропитания. К сожалению, объём генерации ВИЭ в Российской Федерации в сотни раз меньше чем у лидирующих стран мира, и причины этого в дешёвых природных ископаемых, которые используются в традиционной энергетике.

Вторая часть содержит перечень математических соотношений, теоретически описывающих процессы внутри ФЭС и их взаимосвязь между собой. Некоторые соотношения были получены в результате научных исследований, другие же были определены эмпирически.

В третьей части был разработан программный комплекс автономной ФЭС в MatLab Simulink на основе математических формул, описанных во второй части. Представленная модель может произвести анализ режимов работы системы для любого дня года и в любой точке земного. Особенностью модели является высокая прогнозируемая точность выработки электроэнергии, благодаря учёту внешних стохастических погодных условий, а также возможность определять соотношение произведенной и потребленной электроэнергии с высокой временной дискретизации. Модель состоит из девяти опциональных подсхем, которые включаются в расчёт в зависимости от выбранной конфигурации автономной ФЭС,- модель прихода солнечной

радиации на наклонную поверхность, модель суточного хода температуры и изменения температуры поверхности солнечного модуля, модель солнечной батареи, АКБ, преобразователей, а также модель нагрузки.

В четвёртой части было проведено моделирование, в котором в качестве потребителя был выбран дом в селе Анастасьевка в Хабаровском крае. С учётом погодных условий местности было определено, что 48 солнечных панелей это минимальное количество, необходимое для покрытия нагрузки в самый короткий день в году. СБ собирается в систему из четырех последовательных и 12 параллельных модулей. Большое число АКБ и ФМ объясняется высокой мощностью потребителя, высоким уровнем глубины разряда и значительным не совпадением максимумов генерации и потребления. Был выбран контроллер заряда КЭС DOMINATOR MPPT 250/600. Определено, что для соблюдения требований эксплуатации АКБ по допустимой глубине разряда необходимо 40 батарей Delta Battery GX 12 – 200, собранных в цепь из четырех последовательных и 10 параллельных батарей. Инвертор МАП HYBRID-48-6 соединяет между собой потребителя и клеммы АКБ, а солнечный трекер ED-1500 увеличивает эффективность выбранных батарей.

Моделирование для самого короткого (21 декабря) дня в году показало правильность выбранных параметров автономной ФЭС и способность работать долгое время в автономном режиме. Было выделено 3 режима работы. В первом режиме потребление ЭЭ происходит только из АКБ. Этот режим проявляется дважды в сутки – до восхода Солнца и после заката. Главной обязанностью системы является недопущение понижения уровня заряда батареи ниже заданного спецификацией батареи числа. Второй режим – когда спрос потребителя покрывается из АКБ и СБ одновременно. В этом режиме отмечается понижение разрядного тока батареи и замедление снижения уровня SOC. Автономный инвертор является тем звеном, который определяет, какую часть электроэнергии необходимо взять из АКБ. Третий же

режим характеризуется превышением уровня генерации над уровнем потребления. В этом режиме вся непотребленная ЭЭ сохраняется в АКБ.

Сама по себе идея полностью запитать потребителя от одной лишь ФЭС неоправдана, так как она отстраивается от самого худшего режима, в течении которого работает один месяц, а остальное время столь мощная конфигурация её не нужна. Поэтому была проведена экономическая оценка эффективности использования ДГ вместе с ФЭС. Для этого было уменьшено число панелей и рассчитан расход топлива дизель генератора. При уменьшении числа солнечных панелей и АКБ в два раза и добавлении ДГ, себестоимость 1 кВтч ЭЭ уменьшилась на 28%, что доказывает экономическое преимущество гибридных станций над автономными ФЭС.

## Часть 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.

В современном мире перспективность научного проекта определяется прежде всего коммерческой привлекательностью. Поэтому будет произведено планирование научно-исследовательских работ, формирование бюджета научных исследований, а также будет проведена оценка коммерческого потенциала проектируемой станции.

### 5.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения НИ.

#### 5.1.1 Анализ конкурентных технических решений.

Автономными потребителями электрической энергии часто являются небольшие населенные пункты и удаленные от централизованных электроэнергетических сетей. Характер их электропотребления, в основном, определяется бытовой и социальной нагрузкой, а также малыми предприятиями сельскохозяйственного назначения.

Использование альтернативных источников способствует сохранению и улучшению экологической обстановки на данной территории, повышает надежность. Повысить эффективность использования возобновляемых источников можно путем аккумулирования солнечной энергии с целью дальнейшего использования для покрытия электрических и тепловых нагрузок объекта энергоснабжения. Необходимо провести анализ конкурентных технических решений, чтобы сравнить проектируемую установку с конкурентной, и убедиться, что проект не уступает по качеству, надежности и отвечает всем предъявляемым требованиям.

Анализ конкурентоспособности проводится с помощью оценочной карты.

Сравним спроектированную фотоэлектростанцию с АКБ относительно других фотоэлектростанциями:

Фотоэлектростанция с тепловым аккумулятором энергии, в данной ФЭС аккумуляторные батареи предназначены для поддержания бесперебойной

работы, а также в момент переключения между источниками. В качестве основного источника выступает сеть.

Фотоэлектростанция с накопителем энергии. В отличие от первой ФЭС, количество АКБ у этой станции будет значительно больше, следовательно, будет повышаться стоимость всей установки. Основным источником является сеть.

Автономная фотоэлектростанция, в качестве основного источника выступает дизель-генератор.

Все критерии сведены в Таблицу 15.

Таблица 15. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>1</sub>	Б <sub>2</sub>	Б <sub>3</sub>	К <sub>1</sub>	К <sub>2</sub>	К <sub>3</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Надежность работы	0,096 (5)	4	4	4	0,384	0,384	0,38
2. Габаритные размеры	0,058(3)	5	4	3	0,29	0,232	0,17
3. Вырабатываемая мощность	0,096 (5)	3	4	5	0,288	0,384	0,48
4. Масса всей установки	0,096 (5)	5	4	3	0,48	0,384	0,29
5. Экологичность разработки	0,077 (4)	4	4	3	0,308	0,308	0,23
6. Простота обслуживания	0,096 (5)	5	5	4	0,48	0,48	0,38
7. Простота изготовления (монтажа)	0,077 (4)	4	4	4	0,308	0,308	0,31
8. Пожаро - и взрывобезопасность	0,096 (5)	4	4	3	0,384	0,384	0,29
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1.Стоимость всей установки	0,096 (5)	5	4	3	0,48	0,384	0,29
2. Ориентировочный срок службы	0,077 (4)	5	5	5	0,385	0,385	0,38
3. Стоимость электрической энергии	0,077 (4)	5	4	3	0,385	0,308	0,23
4. Финансирование научной разработки	0,058(3)	5	4	4	0,29	0,232	0,23
Итого	1 (52)				4,462	4,173	3,67

Для расчётов используется формула:

$$K = \sum B_i B_i$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;  $B_i$  – вес показателя (в долях единицы);  $B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Как видно из таблицы, самой высокой конкурентоспособностью обладает фотоэлектростанция с тепловым аккумулятором энергии.

### 5.1.2 Технология QuaD

Технология QuaD предназначена для количественной оценки качественных характеристик, таких как конкурентоспособность, эффективность и т.п. Данная технология представляет собой гибкий инструмент измерения характеристик. В ее основе лежит определение средневзвешенной величины таких показателей как, показатель оценки качества разработки, показатель оценки коммерческого потенциала разработки. Каждый показатель необходимо оценить экспертным путем, по стобалльной шкале.

Таблица 16. Оценочная карта качества и перспективности разработки по технологии QuaD

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение (3/4)	Средневзвешенное значение (5x2)
1	2	3	4	5	6
Показатели оценки качества разработки					
1.Надежность работы	0,089 (5)	90	100	0,9	8,01
2. Пожаробезопасность	0,089 (5)	85	100	0,85	7,565
3.Уровень материалоемкости разработки	0,071 (4)	70	100	0,70	4,97
4.Мощность функционирования	0,089 (5)	90	100	0,90	8,01
5.Ремонтоспособность	0,071 (4)	65	100	0,65	4,615
6.Простота устройства в изготовлении	0,071 (4)	65	100	0,65	4,615
7. Габаритные размеры	0,089 (5)	80	100	0,80	7,12

8. Легкость обслуживания	0,071 (4)	85	100	0,85	6,035
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
9. Конкур.-способ. продукта	0,071 (4)	80	100	0,80	5,68
10. Стоимость продукта	0,089 (5)	75	100	0,75	6,675
11. Ориентировочный срок службы	0,071 (4)	90	100	0,90	6,39
12. Затраты на после-продажное обслуживание	0,054 (3)	75	100	0,75	4,05
13. Финансирование научной разработки	0,071 (4)	65	100	0,65	4,615
Итого	1 (56)				78,35

Оценку качества и перспективности по технологии QuaD можно определить по следующей формуле:

$$P_{cp} = \sum B_i B_i$$

где  $P_{cp}$  – средневзвешанное значение показателя качества и перспективной научной разработки;  $B_i$  – вес показателя (в долях единицы);  $B_i$  – средневзвешанное значение  $i$ -го показателя.

Исходя из полученного значения  $P_{cp}$ , можно говорить о перспективах разработки и качестве проведенного исследования. Значение показателя равно 78,35 это говорит о том, что перспективность разработанной установки выше среднего значения, следовательно, фотоэлектростанция имеет перспективу на рынке, и необходимо инвестировать средства в данную разработку и для дальнейшего улучшения характеристик.

## 5.2 Диаграмма FAST

Проведение данного анализа предполагает шесть стадий:

- Выбор объекта FAST-анализа;
- Описание главной, основных и вспомогательный функций, выполняемых объектом;
- Определение значимости выполняемых функций объектом;
- Анализ стоимости выполняемых объектом исследования;

- Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ;
- Оптимизация функций, выполняемых объектом.

В рамках магистерской диссертации в качестве объекта анализа выступает объект исследования.

Таблица 17. Классификация функций, выполняемых объектом исследования.

Наименование детали	Кол-во деталей	Выполняемая функция	Ранг функции		
			Главная	Основная	Вспомогательная
Солнечные батареи	48	Преобразует тепловую энергию в электрическую	X		
АКБ	40	Обеспечивает бесперебойную работу	X		
Инвертор	1	Преобразует постоянное напряжение в переменное		X	
Контроллер заряда	4	Следит за процессом заряда-разряда АКБ		X	
Солнечный трекер	4	Направляет солнечную панель			X
Персональный компьютер	1	При помощи ПК произведен основной расчет			X

Определим значимости выполняемых функций объектом. Для оценки будем использовать метод расстановки приоритетов.

Таблица 18. Матрица смежности.

	I	II	III	IV	V	VI
I	=	=	>	>	>	>
II	=	=	>	>	>	>
III	<	<	=	=	>	>
IV	<	<	=	=	>	>
V	<	<	<	<	=	=
VI	<	<	<	<	=	=

Преобразуем матрицу смежности в матрицу количественных соотношений функций (Таблица 19).

Таблица 19. Матрица количественных соотношений функции

	I	II	III	IV	V	VI	Итого
I	1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	8
II	1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	8
III	0,5	0,5	1	1	1,5	1,5	6
IV	0,5	0,5	1	1	1,5	1,5	6
V	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	4
VI	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	4
							36

Определим значимости функции путем деления балла, полученного по каждой функции, на общую сумму баллов по всем функциям

Таблица 20. Значимость функций.

Наименование детали	Кол-во деталей	Выполняемая функция	Ранг функции		
			Главная	Основная	Вспомогательная
Солнечные батареи	48	Преобразует тепловую энергию в электрическую	0,222		
АКБ	40	Обеспечивает бесперебойную работу (накопитель энергии)	0,222		
Инвертор	1	Преобразует постоянное напряжение в переменное		0,167	
Контроллер заряда	4	Следит за процессом заряда-разряда АКБ		0,167	
Солнечный трекер	4	Направляет солнечную панель			0,111
Персональный компьютер	1	При помощи ПК произведен основной расчет			0,111

Проанализируем стоимости функций, выполняемых объектом исследования.

Таблица 21. Стоимостные показатели каждой функции

Наименование детали	Кол-во деталей	Выполняемая функция	Цена, руб.	Доля, %
Солнечные батареи	48	Преобразует тепловую энергию в электрическую	720,000	0,22
АКБ	40	Обеспечивает бесперебойную работу (накопитель энергии)	1,944,000	0,524
Инвертор	1	Преобразует постоянное напряжение в переменное	93,000	0,092
Контроллер заряда	4	Следит за процессом заряда-разряда АКБ	200,000	0,011
Солнечный трекер	4	Направляет ФМ	788,000	0,22
Персональный компьютер	1	При помощи ПК произведен основной расчет	38,000	0,075
Итого			502 310	1

Построим функционально-стоимостную диаграмму объекта (Рисунок 45)  
Оптимизируем функции, выполняемых объектом.

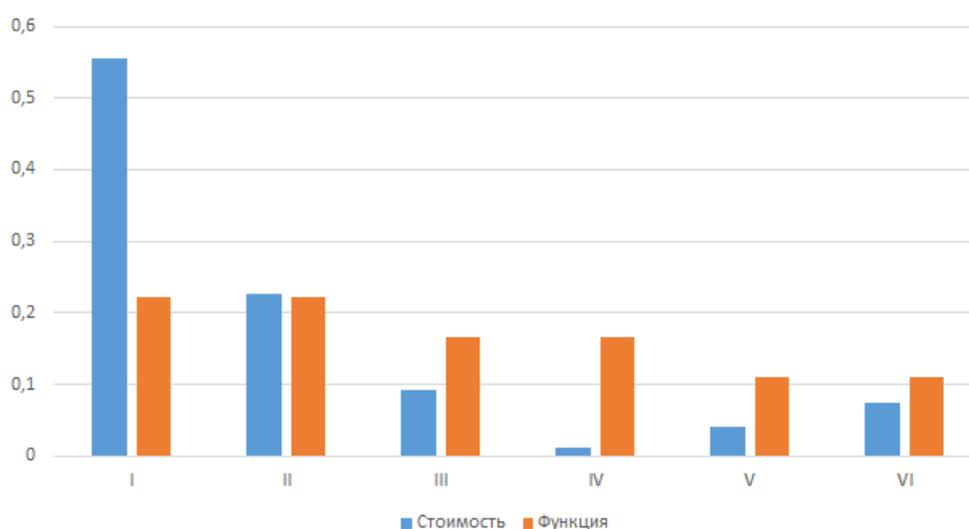


Рисунок 45 – Функционально-стоимостная диаграмма

Исходя из диаграммы, можно проследить явную диспропорцию между важностью функций и затратами на них. В основном это связано со значительной разницей в цене важных узлов данной системы электроснабжения.

### 5.3. Матрица SWOT.

Матрица SWOT нужна для определения сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта, матрица представлена в Таблице 22 SWOT- анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Таблица 22. Матрица SWOT

	Сильные стороны научно – исследовательского проекта:	Слабые стороны научно – исследовательского проекта:
	<p>С1. Простота конструкции (отсутствие обслуживающего персонала);</p> <p>С2. Установка экологична (не приносит вреда окружающей среде) ;</p> <p>С3. Низкая стоимость готового продукта (электрической энергии).</p> <p>С4. Срок службы солнечных батарей составляет 25-30 лет.</p>	<p>Сл 1. Сильно зависит от месторасположения; (солнечная инсоляция)</p> <p>Сл 2. Стоимость всей установки зависит от потребительских нагрузок.</p> <p>Сл 3. Большой срок окупаемости проекта (около 25 лет)</p> <p>Сл. 4. Низкий КПД фотоэлемента</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Широкая зона применения (городские дома, сельские, фермерские хоз-ва и тд)</p> <p>В2. Позволяет экономить ЭЭ на нагрев воды</p> <p>В3. Отсутствие АКБ делает установку более дешевой</p>	<p>Позволяет получить экологически чистую энергию, с широкой областью применения.</p> <p>Отсутствие АКБ позволяет уменьшить общую стоимость всей установки, а это в свою очередь влияет на конечную стоимость энергии.</p>	<p>Так как большое влияние на количество вырабатываемой мощности играет месторасположение установки, необходимо более тщательно подойти к выбору СБ (ФП) (например, вместо поликристаллических фотопанелей применить монокристаллические, КПД будет выше)</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1: Ограниченность бюджета</p> <p>У2: Применение другого</p>	<p>Сильные стороны проекта в достаточной степени минимизируют некоторые возможные угрозы. Например, заявленная экономичность и</p>	<p>Использование другого возобновляемого источника энергии или развитие других фотоэлектрических установок, может привести</p>

возобновляемого источника энергии УЗ: Отсутствие спроса	энергоэффективность проекта обуславливают возникновение спроса. Однако из-за неэффективного финансирования со стороны государства, осуществление проекта может быть затруднено.	к не востребованности данного проекта.
--	--	--

Таблица 23. Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта					
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4
	B1	+	+	0	+
	B2	+	0	0	0
	B3	0	+	+	0

В результате исследования SWOT-анализа было выявлено, что данный технический проект в виду сильного соответствия сильных сторон и возможностей показывает перспективность разработки в данном направлении.

Для того чтобы преодолеть слабые стороны проекта, стратегия должна быть направлена на усовершенствование или изменение их, чтобы воспользоваться возможностями проекта в полной мере. Угроз реально избежать, применив при этом сильные стороны проекта. Сочетание слабых сторон и угроз, позволяет создать мероприятия для того чтобы их минимизировать и улучшить проект.

#### 5.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

В Таблице 24 представлена специальная форма, содержащая показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенции разработчика научного проекта.

Таблица 24. Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации.

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	4	4
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно – технического задела	4	4
3.	Определены отрасли и технологии (товары,услуги) для предложения на рынке	5	4
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	4
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	3
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	3	2
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	4	4
8.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	4	4
9.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	4	4
10.	Разработан бизнес – план коммерциализации научной разработки	4	4
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	4	4
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	3	3
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	4	4

14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	5	4
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	4	4
Итого баллов		60	56

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i$$

где  $B_{\text{сум}}$  - суммарное количество баллов по каждому направлению;  $B_i$  - баллов по  $i$  – му показателю.

Значение  $B_{\text{сум}}$  позволяет говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. Так, если значение  $B_{\text{сум}}$  получилось от 75 до 60, то такая разработка считается перспективной, а знания разработчика достаточными для успешной ее коммерциализации. Если от 59 до 45 - то перспективность выше среднего. Если от 44 до 30 - то перспективность средняя. Если от 29 до 15 - то перспективность ниже среднего. Если 14 и ниже - то перспективность крайне низкая.

Данная разработка считается перспективной, следовательно, необходимо увеличивать объемы инвестирования и улучшить направление проведение оценки стоимости интеллектуальной стоимости, повысить уровень компетенций недостающих разработчику в данном вопросе и предусмотреть возможности привлечения требуемых специалистов в команду проекта.

## 5.5 Планирование научно-исследовательских работ

### 5.5.1 Структура работ в рамках научного исследования

При осуществлении планирования работ необходимо придерживаться следующего порядка:

- Определение структуры работы в проекте;
- Определение вклада каждого участника в работу;

- Определение продолжительности работы;
- Составление графика проектирования.

Группа для проектирования состоит из двух участников, в нее входят: руководитель и студент-дипломник (инженер).

Необходимо составить перечень этапов и работ в рамках исследования, а также для каждого исполнителя определить содержание работ. Список этапов работы и распределение можно увидеть в Таблице 25.

Таблица 25. Перечень этапов работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Составление технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Выбор направления исследований	Инженер
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Проведение теоретических расчетов и обоснований (анализ электропотребления)	Инженер
	6	Оценка технического потенциала возобновляемой энергии	Инженер
	7	Выбор рационального варианта энергетического баланса	Инженер
	8	Выбор структурной схемы гибридного энергетического комплекса	Инженер
	9	Разработка алгоритма взаимодействия между составляющими энергетического комплекса	Инженер
	10	Выбор оборудования энергоустановки	Инженер
Подведение итогов	11	Анализ полученных результатов	Руководитель
	12	Оценка эффективности полученных результатов	Инженер
	13	Построение схемы ФЭС	Инженер

Разработка технической документации и проектирование	14	Разработка плана размещения энергокомплекса в районе электрифицируемого поселка	Инженер
Оформление отчета по НИР	15	Оформление пояснительной записки	Инженер

### 5.5.2 Определение трудоемкости выполнения работ.

Основная часть стоимость разработки состоит из трудовых затрат, поэтому сначала нужно определить трудоемкость работ каждого участника.

Трудоемкость проведения научных исследований оценивается экспертно в человеко-днях и носит вероятностный характер, поскольку зависит от ряда факторов, которые трудно принять во внимание.

Чтобы найти ожидаемое значение трудоемкости, нужно воспользоваться следующей формулой:

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{min}i} + 2t_{\text{max}i}}{5}$$

Формула состоит из таких составляющих как: ожидаемой трудоемкости выполнения  $i$ -ой работы чел.-дн. ( $t_{\text{ож}i}$ ); минимально возможной трудоемкости выполнения заданной  $i$ -ой работы ( $t_{\text{min}i}$ ) (при наиболее благоприятном стечении обстоятельств), чел.-дн.; максимально возможной трудоемкости выполнения заданной  $i$ -ой работы ( $t_{\text{max}i}$ ) (это пессимистическая оценка, при неблагоприятном стечении обстоятельств), чел.-дн.

Из ожидаемой трудоемкости работ, учитывающей параллельность выполнения работ разными исполнителями, можно определить длительность каждой работы. Такой расчет необходим для обоснованного расчета заработной платы, поскольку доля заработной платы в общей сметной стоимости научных исследований составляет примерно 65%.

$$T_{\text{pi}} = \frac{t_{\text{ож}i}}{\text{Ч}_i}$$

Где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;  $t_{ожi}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн;  $Ч_i$  – численность исполнителей, которые выполняют одну и ту же работу одновременно, на определенном этапе, чел.

### 5.5.3 Разработка графика проведения научного исследования/

Необходимо построить диаграмму Ганта, которая является наиболее удобным (наглядным) представлением графика проведения работ.

Диаграмма Ганта представляет собой горизонтальный график, на котором работы представлены в виде протяженных отрезков с датами начала и окончания выполнения работ.

Чтобы удобнее было построить график, необходимо длительность работ перевести в календарные дни из рабочих дней. Для этого воспользуемся представленной формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал}$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения работ в календарных днях;  $T_{pi}$  – продолжительность выполнения работ в рабочих днях;  $k_{кал}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности можно найти по формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}}$$

где  $T_{кал}$  – количество календарных дней в году;  $T_{вых}$  – количество выходных дней в году;  $T_{пр}$  – количество праздничных дней в году.

Полученные значения округляем до целого числа.

В качестве примера, расчет произведем для первой работы руководителя:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{\min} + 2 \cdot t_{\max}}{5} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 4}{5} = 3 \text{ чел.-дн};$$

$$T_p = \frac{t_{ож}}{Ч} = \frac{3}{1} = 3 \text{ дня};$$

$$k_{\text{кал}P} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 52 - 20} = 1,25;$$

$$k_{\text{кал}И} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 104 - 20} = 1,51;$$

$$T_{\text{к}} = T_{\text{р}} k_{\text{кал}P} = 3 \cdot 1,25 = 3,74 \approx 4 \text{ дня.}$$

Полученные значения занесем в Таблице 26.

Таблица 26. Временные показатели проведения научного исследования.

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$		Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$	
	$t_{min}$ , чел-дни		$t_{max}$ , чел-дни		$t_{ожі}$ , чел-дни		Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер				
Составление и утверждение технического задания	2		4		3		3		4	
Подбор и изучение материалов по теме		5		7		6		6		9
Выбор направления исследований		3		4		4		4		6
Календарное планирование работ по теме	1		2		2		2		3	
Проведение теоретических расчетов и обоснований (анализ электропотребления)		5		7		6		6		9
Оценка технического потенциала возобновляемой энергии		7		9		8		8		12
Выбор рационального варианта		2		4		3		3		5

энергетического баланса										
Выбор структурной схемы гибридного энергетического комплекса		2		3		3		3		5
Разработка алгоритма взаимодействия между составляющими энергетического комплекса		3		5		4		4		6
Выбор оборудования энергоустановки		1		3		2		2		3
Анализ полученных результатов	2	4	4	6	3	5	3	5	4	8
Оценка эффективности полученных результатов	3	6	6	10	5	8	5	8	7	12
Построение схемы ФЭС		2		3		3		3		5
Разработка плана размещения энергокомплекса		6		8		7		7		11
Оформление пояснительной записки		5		7		6		6		9

Исходя из полученных данных, построим календарный план-график, разбив его по месяцам и декадам за период дипломирования.

Таблица 27. Календарный план-график проведения НИОКР по теме.

№ ра б	Вид работ	Исполнител и	$T_{ki}$ , кал. дн	Продолжительность выполнения работ												
				февр.		март			апрель			май			июнь	
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Составление и утверждение технического задания	Руководите ль	4	■												
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	9	■												
3	Выбор направления исследований	Инженер	6		■											
4	Календарное планирование работ по теме	Руководите ль	3			■										
5	Проведение теоретических расчетов и обоснований (анализ электропотребления)	Инженер	9			■										
6	Оценка технического потенциала возобновляемой энергии	Инженер	12				■	■								
7	Выбор рационального варианта энергетического баланса	Инженер	5					■								
8	Выбор структурной схемы гибридного энергетического комплекса	Инженер	5						■							
9	Разработка алгоритма взаимодействия между	Инженер	6							■						

	составляющими энергетического комплекса															
10	Выбор оборудования энергоустановки	Инженер	3													
11	Анализ полученных результатов	Руководитель, инженер	4/8													
12	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, инженер	7/12													
13	Построение схемы ФЭС	Инженер	5													
14	Разработка плана размещения энергокомплекса	Инженер	11													
15	Оформление пояснительной записки	Инженер	9													

▨ –руководитель; ■ – инженер.

Из построенного графика видно, что для руководителя длительность работ в календарных днях равна 18 дням, для инженера составляет 102 дней.

### 5.6. Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

Для осуществления оценки экономической составляющей гибридного комплекса необходимо привести данные о стоимости используемого оборудования, затрат на его монтаж и эксплуатацию. Список оборудования, а также его стоимость представлены в Таблице 16.

В качестве критериев экономической эффективности можно выделить годовые затраты на 1 кВт установленной мощности и стоимость 1 кВтч электроэнергии. Для расчёта используются формулы (40) - (43). Стоимость оборудования, комплектующих и доставки:

$$K_{уст} = 720 + 788 + \frac{1,944 + 200 + 93}{10} \cdot 20 + 300 + 20 = 6,3 \text{ млн.руб.}$$

Стоимость строительно-монтажных работ:

$$K_{стр} = k_p K_{уст} = 0.1 \cdot 6.3 = 0.63 \text{ млн.руб.}$$

Общие капиталовложения включают в себя:

$$K = K_{уст} + K_{пр} + K_{стр} = 6.3 + 0.1 + 0.63 = 7.03 \text{ млн.руб.}$$

Стоимость ремонтных работ, запчастей:

$$C_{рем} = k_{рем} P_n (K_{уст} + K_{стр}) = 0.2 \cdot 0.05 \cdot (6.3 + 0.63) = 0.069 \text{ млн.руб.}$$

Стоимость литра топлива составляет 45 рублей, а доставка одного литра – 4 рубля. При 75% загрузке двигателя 1 кВтч стоит 21.27 рубля.

Общегодовые эксплуатационные расходы:

$$C = C_{эск} + C_{рем} + C_{топ} + C_{д.топ.} = 0.05 + 0.069 = 0.119 \text{ млн.руб.}$$

Себестоимость 1 кВтч электроэнергии:

$$C_{эл} = \frac{P_n K + C}{W} = \frac{0.05 \cdot 7.03 + 0.119}{14,722} = 32 \text{ руб.}$$

Годовые затраты на 1 кВт установленной мощности:

$$z = \frac{P_n K + C}{P} = \frac{0.05 \cdot 7.03 + 0.119}{18,240} = 25.82 \text{ руб.}$$

Для оценки экономической эффективности внедрения гибридной системы электроснабжения проведём сравнительную характеристику с СЭС, основанной только на ВИЭ. Полученные данные представлены в Таблице 17.

### 5.7 Определение ресурсоэффективности проекта

Определение ресурсоэффективности проекта можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности по формуле:

$$I_p = \sum a_i \cdot b_i,$$

где  $I_p$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;  $a_i$  – весовой коэффициент разработки (в долях единицы);  $b_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Оценку характеристик проекта проведем на основе критериев, соответствующих требованиям к системе электроснабжения промышленных предприятий: качество электрической энергии; надежность; безопасность; экономичность; гибкость.

Критерии ресурсоэффективности и их количественные характеристики приведены в Таблице 28.

Таблица 28. Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Балльная оценка разработки	Интегральный показатель ресурсоэффективности
1. Качество электрической энергии	0,2	5	1
2. Надежность	0,25	4	1
3. Безопасность	0,25	5	1,25
4. Экономичность	0,15	4	0,6
5. Гибкость	0,15	5	0,75
Итого:	1		4,6

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности технического проекта со составит:

$$I_{p\Sigma} = 0.2 \cdot 5 + 0.25 \cdot 4 + 0.25 \cdot 5 + 0.15 \cdot 4 + 0.15 \cdot 5 = 4.6$$

Вывод. В данном разделе проведена оценка конкурентоспособности, спроектированной фотоэлектростанции с тепловым аккумулярованием по сравнению с другими фотоэлектростанциями в которых в качестве накопителя энергии используются аккумуляторные батареи, рассчитан показатель, оценивающий перспективность данного оборудования, который показал, что уровень перспективности «выше среднего». Из результатов проведенного анализа можно сделать вывод, что проектируемая ФЭС не уступает другим автономным энергоисточникам, некоторые из показателей занимают лидирующую позицию. Это говорит о том, что спроектированная фотоэлектростанция обладает рядом достоинств и в дальнейшем способна конкурировать с различными установками (комплексами).

Так же произведено планирование работ, из календарного плана видно, что остается больше 20 дней до защиты, следовательно, можно сделать вывод, что планирование произведено рационально.

SWOT – анализ показал, что для данного проекта существует достаточно сильное соответствие между возможностями и сильными сторонами, что говорит о перспективности ведения разработок в данном направлении.

Данный проект удовлетворяет требованиям электроснабжения, и его реализация позволяет внедрять технологию производства и увеличивает эффективность установки.

## Часть 6. Социальная ответственность.

### 6.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

#### 6.1.1. Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства.

Работник аудитории 135, 8 корпуса ТПУ имеет право на [36]:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний в соответствии с федеральным законом;
- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за исключением случаев, предусмотренных федеральными законами, до устранения такой опасности;
- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра;

#### 6.1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

Рабочее место в аудитории 135, 8 корпуса ТПУ должно соответствовать требованиям [38]. Оно должно занимать площадь не менее 4,5 м<sup>2</sup>, высота помещения должна быть не менее 4 м, а объем - не менее 20 м<sup>3</sup> на одного человека. Высота над уровнем пола рабочей поверхности, за которой работает оператор, должна составлять 720 мм. Оптимальные размеры поверхности стола 1600 x 1000 кв. мм. Под столом должно иметься пространство для ног с размерами по глубине 650 мм. Рабочий стол должен также иметь подставку

для ног, расположенную под углом  $15^\circ$  к поверхности стола. Длина подставки 400 мм, ширина - 350 мм. Удаленность клавиатуры от края стола должна быть не более 300 мм, что обеспечит удобную опору для предплечий. Расстояние между глазами оператора и экраном видеодисплея должно составлять 40 - 80 см. Так же рабочий стол должен быть устойчивым, иметь однотонное неметаллическое покрытие, не обладающее способностью накапливать статическое электричество. Рабочий стул должен иметь дизайн, исключающий онемение тела из-за нарушения кровообращения при продолжительной работе на рабочем месте.

Рабочее место сотрудника аудитории 135, 8 корпуса ТПУ соответствует требованиям ГОСТ [39].

## 6.2. Производственная безопасность.

Разрабатываемая математическая модель электропривода запорной арматуры подразумевает использование электронной вычислительной машины (ЭВМ). С точки зрения социальной ответственности целесообразно рассмотреть вредные и опасные факторы, которые могут возникать при разработке математической модели или работе с оборудованием, а также требования по организации рабочего места.

6.2.1. Анализ потенциально возможных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.

Для выбора факторов использовался ГОСТ «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [40]. Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды представлен в виде Таблицы 29.

Таблица 29. Опасные и вредные факторы при выполнении работ по разработке программного модуля

Источник фактора, наименование вида работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-2015)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Разработка мат. модели на ЭВМ	Повышенный уровень электромагнитных полей [2, 17]; Недостаточная освещенность рабочей зоны; [2,3, 17];	Поражение электрическим током Пожаро-взрывоопасность	СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 СанПиН 2.2.2.542-96 СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 СанПиН 2.2.4.1191-03 СП 52.13330.2011
Работа с ЭВМ	Повышенный уровень шума на рабочем месте; [2, 17]; Неудовлетворительный микроклимат [2, 17]; Повышенный уровень напряженности электростатического поля [2, 17].		СанПиН 2.2.4.548-96 СН 2.2.4/2.1.8.562-96 ГОСТ 30494-2011

6.2.2. Разработка мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов.

При разработке математической модели электропривода запорно-регулирующей арматуры в аудитории 135, 8 корпуса ТПУ, основным источником потенциально вредных и опасных производственных факторов (ОВПФ) является ЭВМ, возможность поражения электрическим током.

К основной документации, которая регламентирует вышеперечисленные вредные факторы, относится "Гигиенические требования к электронно-вычислительным машинам и организации работы" [41]: ЭВМ должны соответствовать требованиям настоящих санитарных правил и каждый их тип подлежит санитарно-эпидемиологической экспертизе с

оценкой в испытательных лабораториях, аккредитованных в установленном порядке [35].

Допустимые уровни электромагнитных полей (ЭМП) в аудитории 135, 8 корпуса ТПУ [42], создаваемых ЭВМ, не должны превышать значений [43], представленных в Таблице 30.

Таблица 30. Допустимые уровни ЭМП, создаваемых ЭВМ.

Наим. параметров	Диапазон	ДУ ЭМП
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля	-	15 кВ/м

Уровни ЭМП, ЭСП в аудитории 135, 8 корпуса ТПУ, перечисленные в табл.19 соответствуют нормам.

### **Электробезопасность**

Электробезопасность - система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного действия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

Прохождение электрического тока через тело человека вызывает поражение различных органов, оказывает воздействие на нервную систему, кровеносно-сосудистую систему человека, на кровь, сердце, мозг и т.д.

Виды воздействий электрического тока на организм человека:

Термическое воздействие тока проявляется в ожогах, нагрев кровеносных сосудов, сердца, мозга и других органов, находящихся на пути протекания тока до критической температуры;

Электролитическое действие тока выражается в разложении крови, что нарушает ее состав и функции;

Механическое действие тока проявляется в значительном давлении в кровеносных сосудах и мышечных тканях;

Биологическое действие тока проявляется в раздражении живых тканей, что вызывает реакцию организма – возбуждение, что и обуславливает непроизвольное сокращение мышц.

Для предотвращения поражения электрическим током, где размещаются рабочее место с ЭВМ в аудитории 135, 8 корпуса ТПУ, оборудование должно быть оснащено защитным заземлением, занулением в соответствии с техническими требованиями по эксплуатации [44]. Для предупреждения электротравматизма необходимо проводить соответствующие организационные и технические мероприятия: 1) оформление работы нарядом или устным распоряжением; 2) проведение инструктажей и допуск к работе; 3) надзор во время работы. Уровень напряжения для питания ЭВМ в данной аудитории 220 В. По опасности поражения электрическим током помещение 135, 8 корпуса ТПУ относится к первому классу – помещения без повышенной опасности (сухое, хорошо отапливаемое, помещение с токонепроводящими полами, с температурой 18-20°, с влажностью 40-50%) [43].

Основными непосредственными причинами электротравматизма, являются: 1) прикосновение к токоведущим частям электроустановки, находящейся под напряжением; 2) прикосновение к металлическим конструкциям электроустановок, находящимся под напряжением; 3) ошибочное включение электроустановки или несогласованных действий обслуживающего персонала; 4) поражение шаговым напряжением и др.

Основными техническими средствами защиты, согласно ПУЭ, являются защитное заземление, автоматическое отключение питания, устройства защитного отключения, изолирующие электрозащитные средства, знаки и плакаты безопасности. Наличие таких средств защиты предусмотрено в

рабочей зоне. В целях профилактики периодически проводится инструктаж работников по технике безопасности.

Не следует размещать рабочие места с ЭВМ вблизи силовых кабелей, технологического оборудования, создающего помехи в работе ЭВМ [44].

По степени опасности поражения людей электрическим током распределительное устройство, в котором расположен преобразователь частоты, относится к помещениям с повышенной опасностью (2 категория), характеризующиеся наличием в них одного из следующих условий, создающих повышенную опасность, а именно возможности одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам и т.п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования - с другой [44].

Для исключения возможности случайного прикосновения или опасного приближения к токоведущим частям обеспечивается их недоступность путем ограждения, блокировок или расположения токоведущих частей на недоступную высоту. Ограждения применяются как сплошные, в виде кожухов и крышек, применяемые в электроустановках до 1000 В, так и сетчатые, которые имеют двери, запирающиеся на замок [44].

Для защиты персонала от поражения электрическим током в РУ-0,4 кВ используются защитное заземление. Защитное заземление – преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением вследствие замыкания на корпус и по другим причинам (индуктивное влияние соседних токоведущих частей, вынос потенциала, разряд молнии и т. п.). Основное назначение защитного заземления – устранение опасности поражения персонала электрическим током при появлении напряжения на конструктивных частях электрооборудования [44].

В случае если при электропоражении работающий внешне сохранил формат нормального самочувствия, он должен быть осмотрен врачом с заключением о состоянии здоровья, пострадавшему должна быть обеспечена скорая медицинская помощь. Предварительно пострадавший должен быть освобожден от действия электрического тока. Если при этом отключить напряжение быстро невозможно, освобождение от электричества пострадавшего необходимо производить, изолировав себя диэлектрическими перчатками или галошами. При необходимости перерезать провода (каждый в отдельности) инструментом с изолированными ручками. Если есть необходимость (при потере сознания, остановке сердца и т.п.) оказания первой помощи, то до прибытия медработника необходимо начать делать: наружный массаж сердца, искусственное дыхание.

Для предотвращения от поражения электрическим током при прикосновении к корпусам электроустановок, находящихся под напряжением при пробое изоляции или в других случаях, необходимо рассчитать и установить защитное заземление.

Защитное зануление в электроустановках напряжением до 1 кВ - преднамеренное соединение открытых проводящих частей с глухозаземленной нейтралью генератора или трансформатора в сетях трехфазного тока, с глухозаземленным выводом источника однофазного тока, с заземленной точкой источника в сетях постоянного тока, выполняемое в целях электробезопасности [44].

Зануление применяется в четырехпроводных сетях напряжением до 1 кВ с заземленной нейтралью. При занулении корпуса электрооборудования соединяются не с заземлителями, а с нулевым проводом.

Принцип действия: зануление превращает замыкание на корпус в однофазное короткое замыкание, в результате чего срабатывает максимальная токовая защита и селективно отключает поврежденный участок сети. Кроме того, зануление снижает потенциалы корпусов, появляющиеся в момент

замыкания на землю. При замыкании на зануленный корпус ток короткого замыкания проходит через обмотки трансформатора, фазный провод и нулевой провод.

Разработанные мероприятия и расчеты обеспечивают безопасную эксплуатацию электроустановок в аудитории 135, 8 корпуса ТПУ и трансформаторной подстанции [43].

### **Освещение**

В аудитории 135, 8 корпуса ТПУ имеется естественное (боковое двухстороннее) и искусственное освещение. Рабочие столы размещены таким образом, чтобы видеодисплейные терминалы были ориентированы боковой стороной к световым проемам, чтобы естественный свет падал преимущественно слева.

Искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ЭВМ осуществляется системой общего равномерного освещения. В аудитории 135, 8 корпуса, в случаях работы с документами, следует применять системы комбинированного освещения (к общему освещению дополнительно устанавливаются светильники местного освещения, предназначенные для освещения зоны расположения документов).

Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300 - 500 лк [45]. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк [45].

В качестве источников света применяются светодиодные светильники или металлогалогенные лампы (используются в качестве местного освещения) [43].

Таблица 31. Нормируемые показатели естественного, искусственного и совмещенного освещения помещений жилых зданий.

Помещение	Рабочая поверхность и плоскость плоскость нормирования КЕО и освещенности и высота плоскости над полом, м	Естественное освещение		Совмещенное освещение		Искусственное освещение		
		КЕО $e_n$ , %		КЕО $e_n$ , %		Освещенность рабочих поверхностей, лк	Показатель дискомфорта М, не более	Коэффициент пульсации $K_{п}$ , %, не более
		При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении	При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении			
Кабинеты	Г-0,0	3,0	1,0	1,8	0,6	300	-	$\leq 5\%$ (работа с ЭВМ) $\leq 20\%$ (при работе с документацией)

Согласно [43] освещение в аудитории 135 8 корпуса ТПУ соответствует допустимым нормам.

### Шум

При работе с ЭВМ в аудитории 135, 8 корпуса ТПУ характер шума – широкополосный с непрерывным спектром более 1 октавы [46].

Таблица 32. Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для основных наиболее типичных видов трудовой деятельности и рабочих мест.

N пп	Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука (дБА)
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Творческая деятельность *	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

\* руководящая работа с повышенными требованиями, научная деятельность, конструирование и проектирование, программирование, преподавание и обучение, врачебная деятельность. Рабочие места в помещениях дирекции, проектно-конструкторских бюро, расчетчиков, программистов вычислительных машин, в лабораториях для теоретических работ и обработки данных, приема больных в здравпунктах.

Согласно [43] уровень шума в аудитории 135, 8 корпуса ТПУ не более 80 дБА и соответствует нормам.

### **Микроклимат**

Для создания и автоматического поддержания в аудитории 135, 8 корпуса ТПУ независимо от наружных условий оптимальных значений температуры, влажности, чистоты и скорости движения воздуха, в холодное время года используется водяное отопление, в теплое время года применяется кондиционирование воздуха. Кондиционер представляет собой вентиляционную установку, которая с помощью приборов автоматического

регулирования поддерживает в помещении заданные параметры воздушной среды.

Аудитория 135, 8 корпуса ТПУ является помещением I б категории. Допустимые величины интенсивности теплового облучения работающих на рабочих местах от производственных источников, нагретых до темного свечения (материалов, изделий и др.) [47].

Таблица 33. Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений.

Период года	Катег. работ по уровню энергозатрат	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относ. влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Iб	21-23	20-24	40-60	0.1
Теплый	Iб	22-24	21-25	40-60	0.1

Таблица 34. Допустимые величины интенсивности теплового облучения.

Облучаемая поверхность тела, %	Интенсивность теплового облучения, Вт/м <sup>2</sup> , не более
50 и более	35
25-50	70
не более 25	100

В аудитории проводится ежедневная влажная уборка и систематическое проветривание после каждого часа работы на ЭВМ.

Согласно [43] микроклимат аудитории 135, 8 корпуса ТПУ соответствует допустимым нормам.

### 6.3. Экологическая безопасность

В данном подразделе рассматривается характер воздействия проектируемого решения на окружающую среду. Выявляются предполагаемые источники загрязнения окружающей среды, возникающие в результате реализации предлагаемых в ВКР решений.

#### 6.3.1. Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду

Математическая модель является программным алгоритмом и не наносит вреда окружающей среде. С точки зрения влияния на окружающую среду можно рассмотреть влияние серверного оборудования при его утилизации.

Большинство компьютерной техники содержит бериллий, кадмий, мышьяк, поливинилхлорид, ртуть, свинец, фталаты, огнезащитные составы на основе брома и редкоземельные минералы. Это очень вредные вещества, которые не должны попадать на свалку после истечения срока использования, а должны правильно утилизироваться.

Утилизация компьютерного оборудования осуществляется по специально разработанной схеме, которая должна соблюдаться в организациях:

- На первом этапе необходимо создать комиссию, задача которой заключается в принятии решений по списанию морально устаревшей или не рабочей техники, каждый образец рассматривается с технической точки зрения.
- Разрабатывается приказ о списании устройств. Для проведения экспертизы привлекается квалифицированное стороннее лицо или организация.
- Составляется акт утилизации, основанного на результатах технического анализа, который подтверждает негодность оборудования для дальнейшего применения.
- Формируется приказ на утилизацию. Все сопутствующие расходы должны отображаться в бухгалтерии.
- Утилизацию оргтехники обязательно должна осуществлять специализированная фирма.
- Получается специальная официальной формы, которая подтвердит успешность уничтожения электронного мусора.

После оформления всех необходимых документов, компьютерная техника вывозится со склада на перерабатывающую фабрику. Все полученные в ходе переработки материалы вторично используются в различных производственных процессах.

#### 6.3.2. Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду

Процесс исследования представляет из себя работу с информацией, такой как технологическая литература, статьи, ГОСТы и нормативно-техническая документация, а также разработка математической модели с помощью различных программных комплексов. Таким образом процесс исследования не имеет влияния негативных факторов на окружающую среду.

#### 6.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

6.4.1. Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС

Согласно чрезвычайная ситуация - это нарушение нормальных условий жизни и деятельности людей на объекте или определенной территории (акватории), вызванное аварией, катастрофой, стихийным или экологическим бедствием, эпидемией, эпизоотией (болезнь животных), эпифитотией (поражение растений), применением возможным противником современных средств поражения и приведшее или могущее привести к людским или материальным потерям" [48].

С точки зрения выполнения проекта характерны следующие виды ЧС:

- Пожары, взрывы;
- Внезапное обрушение зданий, сооружений;
- Геофизические опасные явления (землетрясения);
- Метеорологические и агрометеорологические опасные явления;

Так как объект исследований представляет из себя математическую модель, работающий в программном приложении, то наиболее вероятной ЧС в данном случае можно назвать пожар. Рассмотрим это на примере распределительного устройства, где располагается блок системы управления.

Согласно [50] РУ-0,4 кВ относится к категории «В», т.е. это помещения, в которых обрабатывают или хранят твердые горючие вещества, в том числе выделяющие пыль или волокна, неспособные создавать взрывоопасные смеси с воздухом, а также горючие жидкости. Перед началом работ в электроустановках в целях безопасности необходимо проводить организационные и технические мероприятия.

К организационным мероприятиям относят выдачу нарядов, распоряжений и допуска к работе, надзор во время работы, оформление перерывов в работе, переводов на другое рабочее место и окончание работы. Наряд и распоряжение – это задания на безопасное производство работ, определяющее их меры безопасности, места и время, а также лица, которым поручено выполнение этих работ. При работе по наряду бригада должна состоять не менее чем из двух человек - производителя работ и члена бригады.

Производитель работ отвечает за правильность подготовки рабочего места, выполнение необходимых для производства работ мер безопасности. Он же проводит инструктаж бригады об этих мерах, обеспечивает их выполнение ее членами, следит за исправностью инструмента, такелажа, ремонтной оснастки. В зависимости от категории электроустановок (свыше или до 1000 В) производитель выполняемых работ должен иметь группу по электробезопасности не ниже IV, в установках до 1000 В и для работ, выполняемых по распоряжению, не ниже III. Перед допуском к работе ответственный руководитель и производитель работ вместе с допускающим проверяют выполнение технических мероприятий по подготовке рабочего места. После этого допускающий проверяет соответствие состава бригады и квалификации включенных в нее лиц.

Основными причинами пожара могут быть: перегрузка проводов, короткое замыкание, большие переходные сопротивления в электрических цепях, электрическая дуга, искрение и неисправности оборудования.

Пожарная профилактика обеспечивается: системой предотвращения пожара; системой противопожарной защиты; организационно - техническими мероприятиями. К мерам предотвращения пожара относятся: применение средств защитного отключения возможных источников загорания (защитного зануления); применение искробезопасного оборудования; применение устройства молниезащиты здания; выполнение правил (инструкций) по пожарной безопасности.

К мерам противопожарной защиты относятся: применение пожарных извещателей; средств коллективной и индивидуальной защиты от факторов пожара; системы автоматической пожарной сигнализации; порошковых или углекислотных огнетушителей, два ящика с песком 0,5 м<sup>3</sup>.

Организационно-технические мероприятия: наглядная агитация и инструктаж работающих по пожарной безопасности, разработка схемы действия администрации и работающих в случае пожара, и организация эвакуации людей; организация внештатной пожарной дружины.

При обнаружении загорания рабочий немедленно должен сообщить по телефону 01 в пожарную охрану и руководителю, далее проводится эвакуация людей и материальных ценностей. Тушение пожара организуется первичными средствами с момента обнаружения пожара.

6.4.2. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при проведении исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС.

При проведении исследований наиболее вероятной ЧС является возникновение пожара в помещении 135, 8 корпуса ТПУ. Пожарная безопасность должна обеспечиваться системами предотвращения пожара и противопожарной защиты, в том числе организационно-техническими мероприятиями.

Основные источники возникновения пожара [49]:

1. Неработоспособное электрооборудование, неисправности в проводке, розетках и выключателях. Для исключения возникновения пожара по этим

причинам необходимо вовремя выявлять и устранять неполадки, а также проводить плановый осмотр электрооборудования.

Электрические приборы с дефектами. Профилактика пожара включает в себя своевременный и качественный ремонт электроприборов.

Перегрузка в электроэнергетической системе (ЭЭС) и короткое замыкание в электроустановке.

Под пожарной профилактикой понимается обучение пожарной технике безопасности и комплекс мероприятий, направленных на предупреждение пожаров.

Пожарная безопасность обеспечивается комплексом мероприятий [49]: обучение, в т.ч. распространение знаний о пожаробезопасном поведении (о необходимости установки домашних индикаторов задымленности и хранения зажигалок и спичек в местах, недоступных детям);

пожарный надзор, предусматривающий разработку государственных норм пожарной безопасности и строительных норм, а также проверку их выполнения;

обеспечение оборудованием и технические разработки (установка переносных огнетушителей и изготовление зажигалок безопасного пользования).

В соответствии с ТР «О требованиях пожарной безопасности» для административного жилого здания требуется устройство внутреннего противопожарного водопровода.

Согласно ФЗ-123, НПБ 104-03 «Проектирование систем оповещения людей о пожаре в зданиях и сооружениях» для оповещения о возникновении пожара в каждом помещении должны быть установлены дымовые оптико-электронные автономные пожарные извещатели, а оповещение о пожаре должно осуществляться подачей звуковых и световых сигналов во все помещения с постоянным или временным пребыванием людей.

Аудитория 135, 8 корпуса ТПУ оснащена первичными средствами пожаротушения: огнетушителями ОУ-3 1шт., ОП-3, 1шт. (предназначены для тушения любых материалов, предметов и веществ, применяется для тушения ПК и оргтехники, класс пожаров А, Е.).

Таблица 35. Типы используемых огнетушителей при пожаре в электроустановках.

Напряжение, кВ	Тип огнетушителя (марка)
До 1,0	порошковый (серии ОП)
До 10,0	углекислотный (серии ОУ)

Согласно НПБ 105-03 помещение, предназначенное для проектирования и использования результатов проекта, относится к типу П-2а.

Таблица 36. Категории помещений по пожарной опасности

Категория помещения	Характеристика веществ и материалов, находящихся (обращающихся) в помещении
П-2а	Зоны, расположенные в помещениях, в которых обращаются твердые горючие вещества в количестве, при котором удельная пожарная нагрузка составляет не менее 1 мегаджоуля на квадратный метр.

В корпусе 8 ТПУ имеется пожарная автоматика, сигнализация. В случае возникновения загорания необходимо обесточить электрооборудование, отключить систему вентиляции, принять меры тушения (на начальной стадии) и обеспечить срочную эвакуацию студентов и сотрудников в соответствии с планом эвакуации.



– Огнетушитель



– Направление движения к эвакуационному выходу



Рисунок 46 - План эвакуации людей на случай пожара

## Список литературы:

1. T. Veziroglu: Hydrogen Energy System: A Permanent Solution to Global Problems, Clean Energy Research Institute, USA, Web Site, visit 2004.
2. Arustamov E.A., S.R.Guildenskiold. Analiz ekologicheskogo sostoyaniya Moskovskoj oblasti v god ekologii Rossii // Inthinternet-magazine "Naukovedenie" Tom 9, N.2 (2017). Accessed 06.01.2019. [Online]. Available: <http://naukovedenie.ru/PDF/85EVN217.pdf>.
3. Wikipedia. World Energy Consumption. Accessed 06.01.2019. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/World\\_energy\\_consumption](https://en.wikipedia.org/wiki/World_energy_consumption)
4. Шулков И.И. Преобразование солнечной энергии: Магистерская диссертация. – Санкт-Петербург, 2016. – 88 с.
5. Gaetan Masson, Izumi Kaizka. Snapshot of global photovoltaic markets 2018. International Energy Agency. – 2018. – P.15.
6. Current and future cost of photovoltaics: long-term scenarios for market development, system prices and LCOE of utility-scale PV systems / Agora Energiewende. – Ettlingen: UKEX GRAPHIC, 2015. – P. 80.
7. Abou El-Maaty Metwally Metwally Aly Abd El-Aal. Modeling and simulation of a photovoltaic fuel cell hybrid system: A dissertation in candidacy for the degree of Doctor in Engineering. - Kassel, 2005. - P. 144.
8. S. Krauter and R. Araujo: New Power Conditioning Unit Incorporating Charge Controller, Energy Flow Monitor, Data Logger, DC/AC Converter for Stand Alone and Combined PV-Diesel Operation, Proc. 16th EPVSEC, Glasgow, UK, 2000, pp. 2575-2577.
9. P. Hollmuller, J. Joubert, B. Lachal, and K. Yvon: Evaluation of a 5 kWp Photovoltaic Hydrogen Production and Storage Installation for a Residential Home in Switzerland, International Journal of Hydrogen Energy 25, 2000, pp. 97-109.
10. M. Almonacid and J. Aguilera: Fuzzy Logic Charge Regulator, 2nd World Conference And Exhibition on PV Solar Energy Conversion, Vienna, Austria, 1998, pp. 3273- 3275.
11. The Russian Government. Renewable Energy: facts and solutions during last 6 years. Accessed 06.01.2019. [Online]. Available: <http://government.ru/info/32121/>

12. Обухов С.Г. Выбор параметров и анализ эффективности выбора системы слежения за Солнцем/ Обухов С.Г., Плотников И.А. - Томск: Известия Томского политехнического университета. 2018. Т.329. №10. 95-106 с.
13. Обухов С.Г. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации/ Обухов С.Г., Плотников И.А. - Томск: Известия Томского политехнического университета. 2017. Т.328. №6. 35-81 с.
14. Kusakana K., Vermaak H.J. Hybrid diesel generator/renewable energy system performance Modeling. *Renewable Energy*, 2014, vol. 67, pp. 97–102.
15. Upadhyay S., Sharma M.P. A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 38, pp. 47–63.
16. Badoud A.E. Modeling, design and simulation of stand alone photovoltaic power systems with battery storage/ Badoud A.E., Khemliche M. – Maabouda: Leonardo Journal of Science. 2013. Issue 22. pp. 123-142.
17. Обухов С.Г., Плотников И.А. Математическая модель прихода солнечной радиации на произвольно-ориентированную поверхность для любого региона России. *Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE)*. 2017;(16-18):43-56.
18. M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, “Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays”, *IEEE Trans. on power Electron.* vol. 24, no. 5, May 2009.
19. S. J. Chiang, K. T. Chang, and C. Y. Yen, “Residential photovoltaic energy storage system”, *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 45, no. 3, pp. 385-394, June 1998.
20. Пост С.С. Имитационная модель контроллера солнечной батареи/ Пост С.С., Донцов О.А. - Томск: Известия Томского политехнического университета. 2014. Т.325. №4.
21. T. Esmam and P. L. Chapman, “Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques,” *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, June 2007.
22. Tremblay O., Dessaint, L.-A., Dekkiche, A.-I. A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles / Vehicle power and Propulsion Conference. VPPC 2007. – P.284-289.

23. Tremblay O., Dessaint L.-A. Experimental Validation of a battery Dynamic model for EV Applications // World Electric Vehicle Journal. – 2009. – V. 3. – P. 1-10.
24. Liu B.Y.H., Jordan R.C. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator // ASHRAE Journal. – 1961. – V. 3. – P. 53–59.
25. Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. fourth edition. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013. – 910 p.
26. The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set. Accessed 14 August 2019. [Online]. Available at: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
27. Meyer E.L., van Dyk E.E. Development of energy model based on total daily irradiation and maximum ambient temperature // Renewable Energy. – 2000. – V. 21 (1). – P. 37–47.
28. Jones A.D., Underwood C.P. A thermal model for photovoltaic systems // Solar Energy. – 2001. – V. 70 (4). – P. 349–359.
29. Weather forecast. Accessed 17.06.2018. [Online]. Available: [https://rp5.ru/Архив\\_погоды\\_в\\_Хабаровске](https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Хабаровске)
30. Будзко И.А. и др. Электроснабжение сельского хозяйства / И.А.Будзко, Т.Б.Лещинская, В.И.Сукманов. – М.: Колос, 2000. – 536 с.
31. JA SOLAR. Accessed 06.03.2019. [Online]. Available: <http://www.jasolar.com/uploadfile/2019/0107/20190107012725395.pdf>
32. МАП Энергия. Accessed 16.08.2019. [Online]. Available: [http://www.invertor.ru/zzz/item/kes\\_dominator\\_mppt\\_200\\_100](http://www.invertor.ru/zzz/item/kes_dominator_mppt_200_100)
33. Delta Batt. Accessed 16.08.2019. [Online]. Available: <http://www.delta-batt.com/catalog/gel/>
34. LLC “Energosystemy”. Accessed 07.03.2019. [Online]. Available: <http://энергосистемы.рф/трекеры>
35. Дизель генератор. Accessed 16.08.2019. [Online]. Available: <https://www.220-volt.ru/catalog-594601/#ui-tabs-description>

36. И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебное пособие» - Томск: Изд-во ТПУ, 2014 – 35 с.
37. Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 05.02.2018)
38. Методические указания по разработке раздела «Социальная ответственность» выпускной квалификационной работы магистра, специалиста и бакалавра всех направлений (специальностей) и форм обучения ТПУ, Томск 2019
39. ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя, 2017
40. ГОСТ 12.0.003-2015 Опасные и вредные производственные факторы. Классификация, 2015
41. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий, 2003
42. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы», 2003
43. Специальная оценка условий труда в ТПУ. 2018.
44. Правила устройства электроустановок. Седьмое издание, 2019
45. СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение», 2011
46. СН 2.2.4/2.1.8.562–96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки», 1996
47. СанПиН 2.2.4.548–96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений», 1996
48. ГОСТ Р 22.0.02-94 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения основных понятий»
49. ГОСТ 12.1.004.91 «Пожарная безопасность. Общие требования»

## Приложение А

### Раздел 1

### Solar energy review

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM7Ч	Абрамов Тимофей Юрьевич		

Руководитель ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Обухов Сергей Геннадьевич	д.т.н.		

Консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Обухов Сергей Геннадьевич	д.т.н.		

## **Chapter 1. Solar energy review.**

### **1.1. Renewable energy**

Conventional energy sources such as oil, gas and coal, which are used to convert energy in electricity all around the world, are rapidly depleted. In addition, combustion products are the cause of global problems: the greenhouse effect and pollution, which poison and cause huge damage to all life on the planet. Environment conditions – one of the most important social-ecological problem, that influences at the all citizens. Pleasant environment is necessary condition for state development and citizens health [3]. In this regard, renewable energy sources (solar, wind, geothermal) have been developing rapidly over the past decade. The great potential of solar energy is attractive to be used. United Nations Organization evaluates annual potential of solar energy is 1,575 – 49,837 EJ. It exceeds total world consumption, that was equal 567 EJ in 2012 [4]. The potential of solar energy that can be used by humans is distinguished from the amount of solar energy present near the planet's surface, as factors such as geography, the time of day changing, cloudiness, earth's availability to humans - constraint the amount of solar energy we could take [5].

Since its first application in space missions in 1958, solar photovoltaics technology has come a long way. The photovoltaic systems programme (PVPS) of the International Energy Agency (IEA) was established in 1993 and is one of the IEA's research and development cooperation agreements. At the moment there are 32 countries-participants. The program exists to "coordinate international collaborative efforts that enhance the role of photovoltaic solar energy in the transition to sustainable energy systems." In PVPS's snapshot mentioned that about 97.9 GW of the capacity installed in the countries-participants of the Program in 2018 and in total all over the world with 99.8 GW. At the end of 2018, the installed capacity of the world solar energy exceeded 500 GW.

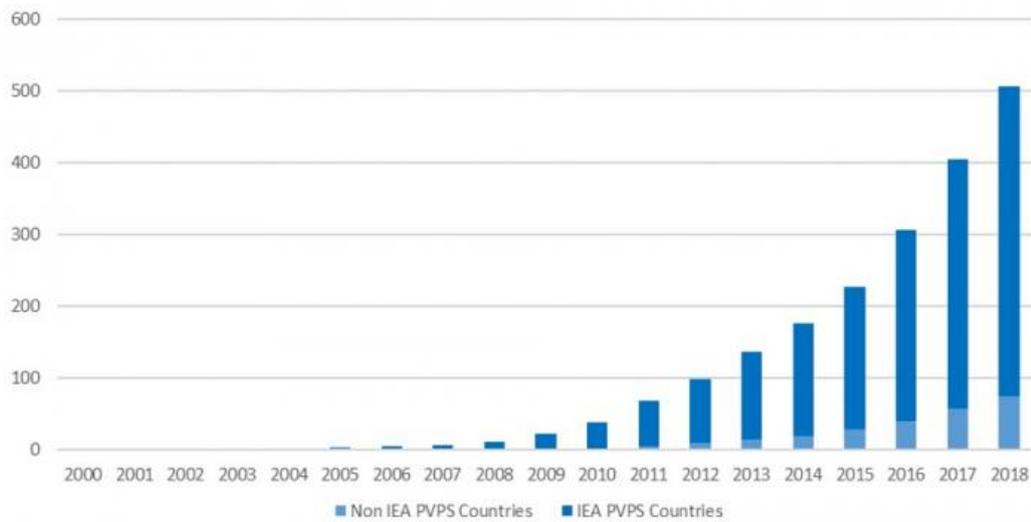


Figure 1. Growth of the PV system's install capacity [6]

Table 1. Top 10 countries for total install capacity in 2018

	Country	Cumulative capacity, GW
1	China	176.1
2	USA	62.2
3	Japan	56.0
4	Germany	45.4
5	India	32.9
6	Italy	20.1
7	UK	13.0
8	Australia	11.3
9	France	9.0
10	Korea	7.9
	EU	115.0

There is highlighted that there are already 32 countries on the planet, each of which has more than 1 GW of solar power. The IEA PVPS report estimates that solar energy produced approximately 2.6% of the world's electricity consumption and 4.3% of European in 2018. Of course, in some countries the share of the sun is higher. For instance, in Germany, which is not the sunniest place on the planet, photovoltaics produced about 7.9% of electricity. [6]

In Germany, a breakthrough in costs was observed over the last years, following a decade of massive investment in research and deployment. New solar photovoltaic

power plants in Germany today cost almost 80 percent less than those built several years ago. Solar photovoltaics is already today a low-cost renewable energy technology. Cost of power from large scale photovoltaic installations in Germany fell from over 40 ct/kWh in 2005 to 9ct/kWh in 2014. Even lower prices have been reported in sunnier regions of the world, since a major share of cost components is traded on global markets. Solar power will soon be the cheapest form of electricity in many regions of the world. Even in conservative scenarios and assuming no major technological breakthroughs, an end to cost reduction is not in sight. Depending on annual sunshine, power cost of 4-6 ct/kWh are expected by 2025, reaching 2-4 ct/kWh by 2050 (conservative estimate).[7]

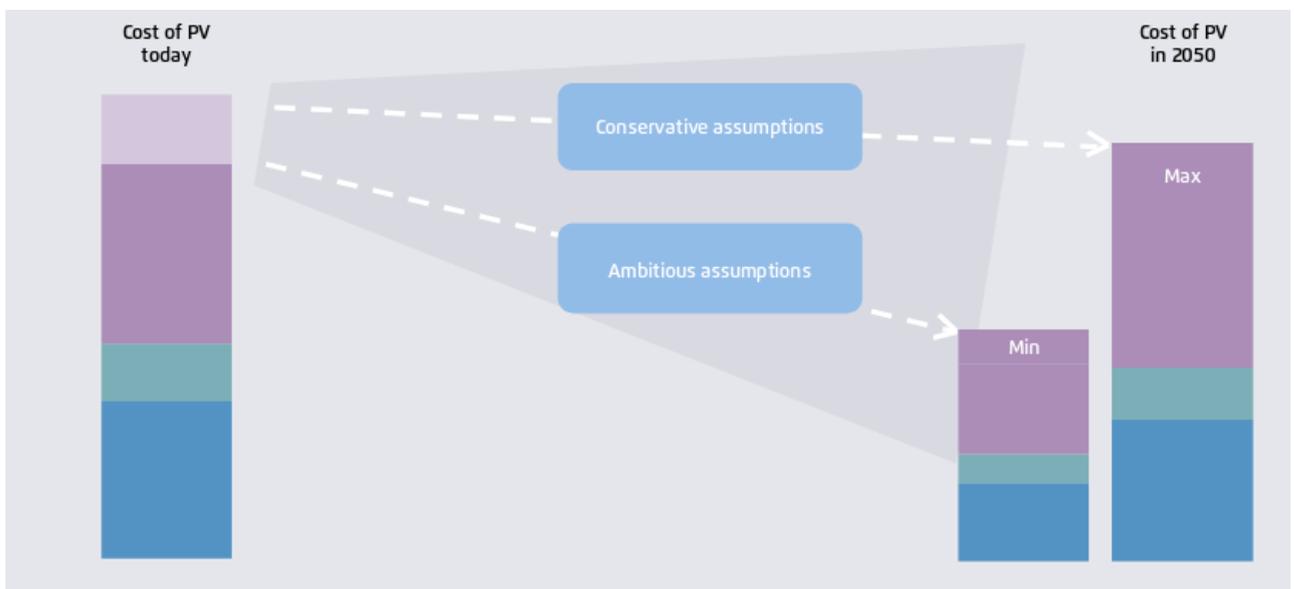


Figure 2. Cost of PV forecast

The analysis of [7] of different scenarios concludes that an end to cost reduction for power from solar photovoltaics is not in sight. Even in the most conservative scenarios for market development, without considering technology breakthroughs, significant further cost reductions are expected.

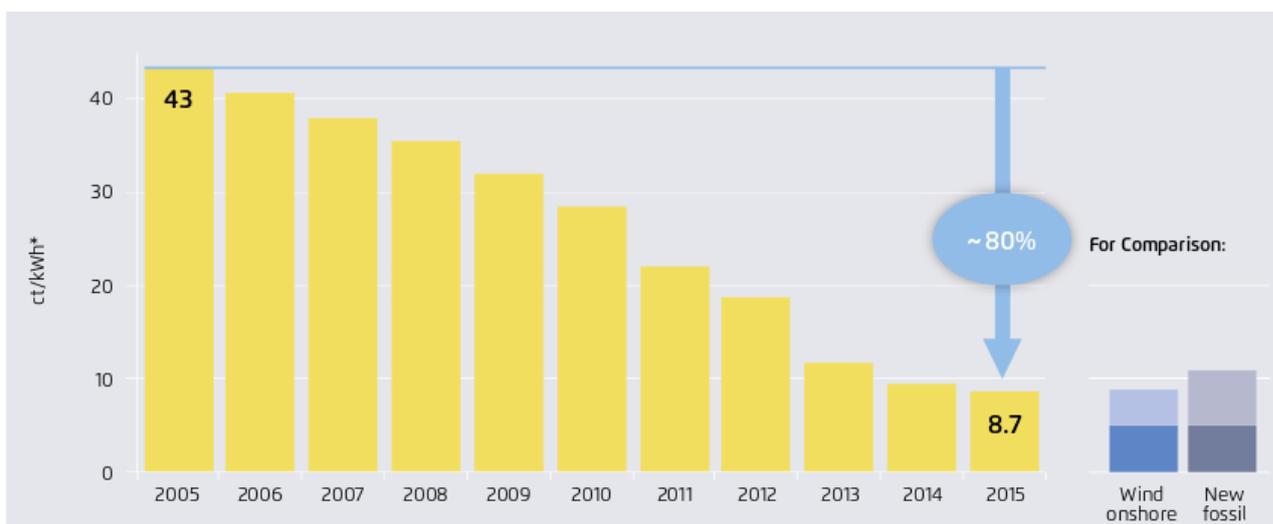


Figure 3. Feed-in tariff for new large-scale solar photovoltaic in Germany (in nominal values)

The following methodology in [7] was used to reach this conclusion: the starting point of the analysis was to derive consistent scenarios for the global photovoltaics market development between 2015 and 2050. These scenarios were discussed and revised in expert workshops and represent a range from “very pessimistic” to “very optimistic” in terms of global photovoltaics market developments. In the most pessimistic scenario, annual additional photovoltaic installations would increase from to 175 GW in 2050 (cumulated produced capacity until 2050 of ~6000 GW). In the most optimistic scenario (“breakthrough scenario”), 1780 GW of photovoltaic systems will be installed per year by 2050 (cumulated produced capacity by 2050: ~36000 GW).

### 1.1. Development in the Russian Federation

If look at the global trends, possible to see the boom of solar energy growth. In just a few years, in many countries price per kWh has come close to the price of electricity from coal and gas plants. The question is: what place does our country take in these processes? Maybe solar energy is not for Russia? After all, Russia is located in the North, but stereotypes connect solar energy with those countries where it is hot all year round. However, scientific evidence refutes this view. Thus, according to the Institute of energy strategy, the potential of solar energy entering

the territory of Russia in just three days exceeds the energy of the total annual electricity production in the country. The amount of solar radiation varies from 810 kWh per square meter per year in remote Northern areas to 1,400 kWh in the South. And in general, the idea that Russia is a sunless country is fundamentally wrong. In many regions, including Zabaikalsky region and Yakutia, solar energy is much higher than in the Krasnodar region. There are more sunny days and solar radiation than in the southern areas.

It is not surprising that solar energy is today one of the leading areas of renewable energy. Only in 2017, the installed capacity of solar generation, operating in the Russian wholesale electricity market and capacity, reached 224 MW. The largest of the solar power plants built in Russia are located in the Orenburg region and in the republics of Bashkortostan and Altai. In the period from 2018 to 2023, another 1.5 GW of solar generation will be built in Russia.

For Russia, with its huge reserves of natural resources, the development of alternative energy is also considered very important, because of the big size and difficult climatic conditions in most of the territory. On 70% of the territory of Russia there is no centralized power supply. About 20 million people live in this territory. High transport costs and a steady rise in motor fuel prices determine high tariffs for electricity production in decentralized power supply systems (up to 50-60 rubles per kWh), as in remote areas electricity is produced by diesel generators, because of the high cost or inability to connect consumers to a centralized power supply system. Cheap natural resources are the main reason why the scale of the Russian solar energy is negligible in comparison, for instance, with China, where its capacity is higher by almost 200 times. However, it cannot be denied that solar energy has good outlook in the country. The country has a number of enterprises producing components for solar power plants – from silicon wafers, supporting structures and all types of cable and wire products to the full cycle of production of solar modules. In particular, Russia has mastered the creation of one of the key

components – inverters (current converters for PV modules and wind generators), increased the necessary competence in the design, engineering and construction of solar power plants.

Renewable energy (solar, wind and small hydropower) has been developed in Russia during 6 years. There were built more than 130 MW of renewable sources (almost all capacity is photovoltaic plants) in 2014-2016 years, 140 MW (100 MW – photovoltaic plants) in 2017. The average capital cost was reduced on 10,7% in solar energy in 2017. Even nowadays economically reasonable to use RES in remote and inaccessible areas on the Far East. Except the improving of power supply reliability in remote areas, the priority direction of RES development in Russia is producing of advanced technologies for export. In solar energy was created a cycle – from the science and production of photovoltaic modules to the construction and operation of PV systems. On July 3, 2017, the production of solar panels based on domestic heterostructure technology was established in Novocheboksarsk. The modules have an efficiency higher than 22% and among the world there are three leaders in efficiency in mass production. 19 September 2017 put into operation the first solar power plant, built using heterogeneous modules, the Mayminsky SES in the Republic of Altai. [8]

The highest value of solar radiation is in the Krasnodar region and Khabarovsk region, so the solar energy application is much profitable there. The cost of electricity on the Far East is significantly higher average value in Russia (in some regions in 5 times). But according the law in 2017 (it was confirmed in order to support development of this region) price for electricity was restricted by 4 rub for 1kWh, and 24 mlrd rub should be paid by the rest Russian regions, so the tariff was increased on 1,8% [9]. In 2018 price for electricity was restricted by 4,3 rub per 1kWh [10]. Renewable energy implements in Far East (Respublica Saha, Chyhotskaya oblast, Khabarovskaya oblast') for supplying rural areas and enterprises [11]. Plans of Russian governments: “Microgeneration will appear in

construction, especially in "smart homes". Built-in technology will be used. This is the next stage of development of the "sun", when solar panels will be insert into the building. Another idea — transportable — window that is not darkened and at the same time is a solar battery, generates electricity. All these wonderful prospects, which I am talking about, are not 2018, but 2020-2025”.

## Chapter 2. Photovoltaic system

### 2.1. Design of PV system

The purpose of this item is determine the output power of PV system. The main components of stand-alone PV system are: solar battery, with a series-parallel set of photovoltaic cells; DC-DC converter, which is operated by maximum power point tracking controller; storage system is based on storage battery; inventor. Frequently, solar track is applied for efficiency increasing. In this case PV system include operational block and executive mechanism of the tracking system, which based on engines and gears.

For this thesis PV system doesn't require storage battery, because of the specific of project. In the both approaches in each point of time consumption exceeds the demand, and this power generating supplement just reduce a little bit the base load. PV system structure submitted in the Appendix A, figure A.1

Solar battery – the main component of PV system. The principle of operation of the solar panel based on the physical properties of semiconductors with the ability to create, under the influence of sunlight, electronic conductivity "p-n" type. Between the electrodes of the device, a potential difference is created, and when the load is connected, an electric current flows in the circuit.

DC-DC converter with MPPT controller allows to increase output power of solar modules without changing their number. If you look at the typical current-voltage characteristic of the solar battery, you can observe the power output can be increased if the controller will monitor the point of maximum power of the solar battery.

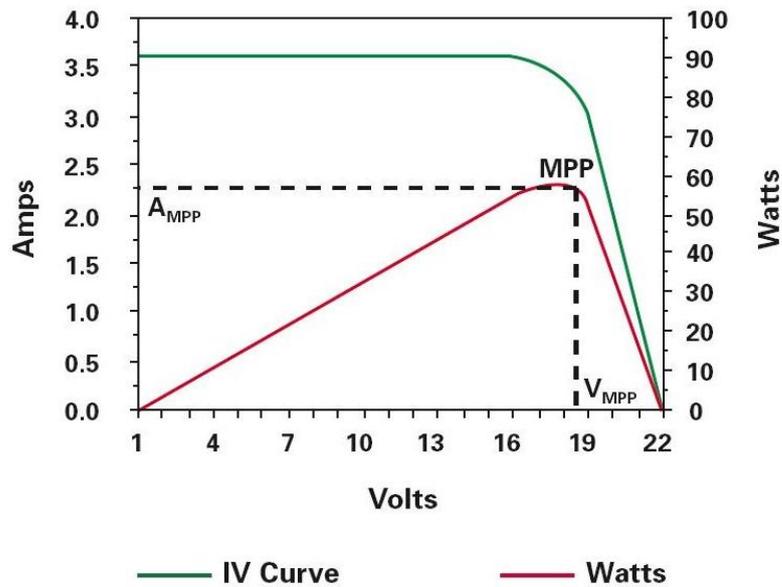


Figure 4. Volt-amps diagram[12]

MPPT controller tracks current and voltage on solar battery and multiplies them to determine the current and the voltage which lead to maximum output power. The approach consists power point changes and compares differences between new and previous outputs.

Solar tracker is a device for orienting a solar photovoltaic panel or concentrating solar reflector or lens toward the sun. The sun's position in the sky varies both with the seasons and time of day as the sun moves across the sky. Solar powered equipment works best when pointed at or near the sun, so a solar tracker can increase the effectiveness of such equipment over any fixed position, at the cost of additional system complexity. There are many types of solar trackers, of varying costs, sophistication, and performance.

## 2.2. Simulation of PV system

PV system's install capacity will be calculated in the created model in MatLAB Simulink. To determine the output power for one day with high accuracy it is necessary to consider all significant influences. Model is applied for accuracy increasing. Each average day of months will be simulated and then multiplied on number of days to define monthly generation. Assumed that during the month output

power increases or decreases homogeneous, so the error of this approach is minimum.

Simulation of stand-alone PV system includes the 4 main components: model of solar radiation, model of solar battery, daily temperature model, model of temperature of photovoltaic sell surface. The particularity of this model is taking into the account external climatic features on the energy characteristics of the solar battery, which provides an increase in the accuracy of predicate power generation.

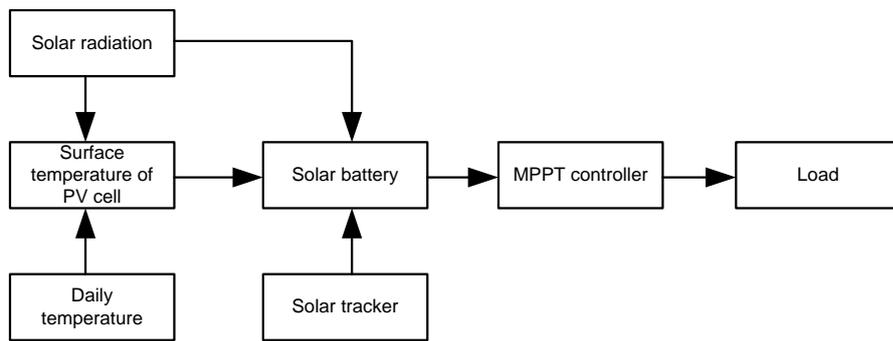


Figure 5. Standalone photovoltaic system's block diagram

### 2.2.1. Solar radiation

The intensity of solar radiation outside the earth's atmosphere is almost constant and is equal to 1367W/m<sup>2</sup>. However, there are stochastic factors that influence the intensity of radiation on the Earth's surface - the state of the atmosphere and the orientation of the receiving surface. The ultimate task of solar radiation modeling is to determine the magnitude of incoming solar radiation for any day of the year in an arbitrary geographical location of the PV system, which leads to simulation of all factors that affect on solar radiation. Block diagram of solar radiation is attached in Appendix A, Figure A.2.

Total solar radiation on an arbitrarily oriented surface on the Earth's surface is calculated by the formula [13]:

$$I_{total}^{\beta\gamma} = I_{beam}^{\beta\gamma} + I_{dif}^{\beta\gamma} + I_{refl}^{\beta\gamma} = I_{beam}^{hor} \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} + I_{dif}^{hor} \cos^2 \left( \frac{\beta}{2} \right) + \rho I_{total}^{hor} \sin^2 \left( \frac{\beta}{2} \right) \quad (1)$$

$I_{total}^{\beta\gamma}, I_{beam}^{\beta\gamma}, I_{dif}^{\beta\gamma}, I_{refl}^{\beta\gamma}$  – values of the total, beam, diffuse and reflected solar radiations

on the arbitrarily oriented surface,  $\frac{W}{m^2}$ ;

$I_{beam}^{hor}, I_{dif}^{hor}, I_{refl}^{hor}$  – values of the total, beam, diffuse and reflected solar radiations on

the horizontally oriented surface,  $\frac{W}{m^2}$ ;

$\theta$  – angle of drop, angle between the beam radiation on a surface and the normal to that surface;

$\theta_z$  – zenith angle, the angle between the vertical and the line to the sun, that is, the angle of drop of beam radiation on a horizontal surface;

$\beta$  – slope, the angle between the plane of the surface and the horizontal;  $0 \leq \beta \leq 180^\circ$

( $\beta \geq 90^\circ$  means that the surface has a downward-facing component);

$\rho$  – ground albedo.

Value  $\theta$  is determined from the equation [14]:

$$\theta = \arccos \left( \begin{array}{l} (\sin \varphi \cos \beta - \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma) \sin \delta + \\ + \cos \delta (\sin \beta \sin \gamma \sin \omega + (\cos \varphi \cos \beta + \sin \beta \sin \varphi \cos \gamma) \cos \omega) \end{array} \right) \quad (2)$$

where:

$\varphi$  – latitude, the angular location north or south of the equator;

$\gamma$  – surface azimuth angle, the deviation of the projection on a horizontal plane of the normal to the surface from the local meridian, with zero due south, east negative, and west positive;  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$  [14];

$\delta$  – declination, the angular position of the sun at solar noon with respect to the plane of the equator;

$\omega$  – hour angle, the angular displacement of the sun east or west of the local meridian due to rotation of the earth on its axis at  $15^\circ$  per hour; morning negative, afternoon positive [14].

Declination is calculated by:

$$\delta = 23.45 \sin(0.9683 \cdot (N + 284)) \text{ degree.} \quad (3)$$

Sun azimuth angle is determined from:

$$\cos A_z = \frac{\sinh \sin \varphi - \sin \delta}{\cosh \cos \varphi} \quad (4)$$

The height of the rise of the sun above the horizon [ $h$ ] (the angle in the vertical plane between the sun's beam and its projection on the horizontal plane) plus the zenith angle [ $\theta_z$ ] is  $90^\circ$ , therefore:

$$h = 90^\circ - \theta_z \text{ degree.} \quad (5)$$

Zenith angle is:

$$\theta_z = \arccos(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega) \text{ degree.} \quad (6)$$

Hour angle is:

$$\omega = 15(t - 12 - T_{ratio} - \Delta T_{UTC}) + \psi \text{ degree.} \quad (7)$$

Where  $t$  – current official time, h;  $\Delta T_{UTC}$  – offset between currency official time and Greenwich time, h;  $\psi$  – longitude of the receiving plane point, degree.

Time ration for the equation of time is determined by the formula:

$$T_{ratio} = \frac{1}{60}(9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B)) \text{ h;} \quad (8)$$

Where:

$$B = 0.9683 \cdot (N - 81) \text{ degree;} \quad (9)$$

$N$  – the calendar day number from the beginning of the year.

Extra-atmospheric radiation on a horizontal surface, which is determined by Spencer's formula [14]:

$$I_0 = 1367(1 + 0.33 \cos(0.9863N)) \cos(\theta_z) \frac{W}{m^2} \quad (10)$$

To take into account the real characteristics of solar radiation, the average values of the atmospheric transparency index  $K_T$  for a given month, obtained from the database of the NASA [15] for the 22-year period of observations from 1983 to 2004.

$$K_T = \frac{I_{beam}^{hor}}{I_0}. \quad (11)$$

The value of diffusing radiation is determined through diffuse factor  $K_D$ :

$$K_D = \frac{I_{dis}^{hor}}{I_{beam}^{hor}}. \quad (12)$$

The block diagram of solar radiation calculation is attached in the appendix B, figure B.4.

There are 7 inputs determine the value of the final solar intensity:

1. Latitude;
2. Surface azimuth angle;
3. Slope;
4. Calendar day number;
5. Atmospheric transparency index;
6. Ground albedo;
7. Solar tracker presence.

The inputs are set via the parameter block Constant.

At the design stage of the PV, the issue of the solar tracker should be resolved. On the one hand, effectiveness increases on 40-45%, which allows to use fewer solar panels to cover the required load. On the other hand, the high cost may be an obstacle to the installation of the tracker.

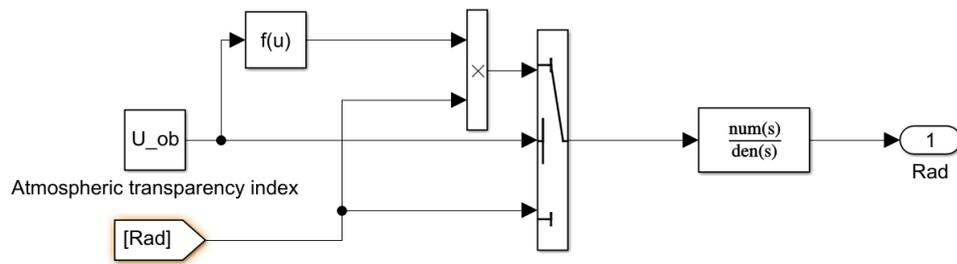


Figure 6. The output value of solar radiation

The model was transferred in subsystem with capability to change inputs for solar radiation simulation at any location, as well as for any day of the year.

Let's check the adequacy of this model by providing simulation. Let's choose the April, 13, point in Russia. Solar tracker is absent.

The result of the simulation is an oscillogram of the solar radiation. The presence of pulsations describes the possibility of clouds, as it is impossible to predict their presence. The figure is submitted in Appendix B Figure B.1. In order to observe solar tracker influence, the plot with solar tracker is submitted in Figure B.2.

As can be seen from the results, the output value of radiation took a flatter form, with the area under the radiation curve has increased significantly, which proves the effectiveness of the Sun tracking system.

Ripple describes cloud influence. Delete the random number generator to observe the waveform without ripple (Figure B.3.).

### 2.2.2. Daily temperature

The temperature changes has a daily character. The air temperature changes after the temperature of the earth's surface. As the air heats and cools from the earth's surface, the rise in air temperature begins with the rise in soil temperature (15 minutes later) in the morning, after sunrise. At 13-14 h (depends on latitude) soil temperature begins to decrease. In 14-15 hours begins to fall and the air temperature. Thus, the minimum in the daily course of the air temperature at the earth's surface falls on the time shortly after sunrise, and the maximum - 14-15 hours. In accordance with the

process of changing the air temperature, it is obvious that the curve of the daily course of temperature has a form close to the sine wave.

For temperature calculation could be used the equation:

$$T(t) = \bar{T} + 0.5\Delta T \cos\left(2\pi \frac{t_{cur} - t_{max}}{t_{per}}\right) \text{ } ^\circ C \quad (13)$$

$\bar{T}$  – daily average air temperature,  $^\circ C$ ;

$\Delta T$  – daily air temperature's amplitude,  $^\circ C$ ;

$t_{per}$  – the period of air temperature changing,  $h$ ;

$t_{max}$  – local temperature maximum time,  $h$ ;

$t_{cur}$  – local sun time,  $h$ .

The result of the simulation is to determine the change in air temperature during the day, which affects the generation of electricity. During the day, the air temperature changes along a sinusoidal curve.