

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Отделение Электроэнергетики и электротехники

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Влияние моделей обратного тока насыщения диода на выходные характеристики двух-диодной модели солнечной батареи в среде Matlab Simulink

УДК 621.311.243-2-047.37:621.382.2:004.42

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А5А	Поярков Дмитрий Евгеньевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ	Рубан Николай Юрьевич	к.т.н.		

Консультант ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЭЭ	Бай Юлий Дмитриевич			

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель ОСГН	Потехина Нина Васильевна			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД	Сотникова Анна Александровна			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника	Шестакова Вера Васильевна	к.т.н., доцент		

Планируемые результаты обучения по ООП «Электроэнергетика»

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
Общие по направлению подготовки (специальности)		
P1	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области <i>электроэнергетики</i>	Требования ФГОС ВО, СУОС (ПК-20, ПК-19, ПК-21), <i>CDIO Syllabus</i> (4.3, 4.7, 4.8), Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в областях <i>электроэнергетики</i>	Требования ФГОС ВО, СУОС (УК-4 *(ОК-5), ОПК-1, ПК-2), <i>CDIO Syllabus</i> (3.2, 4.7), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области <i>электроэнергетики</i>	Требования ФГОС ВО, СУОС (УК-4 *(ОК-5), УК-5 *(ОК-6)), <i>CDIO Syllabus</i> (3.1), Критерий 5 АИОР (п. 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.	Требования ФГОС ВО, СУОС (УК-5 *(ОК-6), УК-7 *(ОК-8)), <i>CDIO Syllabus</i> (2.5), Критерий 5 АИОР (п. 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P5	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области <i>электроэнергетики</i> с учетом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.	Требования ФГОС ВО, СУОС (УК-5*(ОК-6), УК-7 *(ОК-8), УК-8 *(ОК-9), ПК-3, ПК-4, ПК-10), <i>CDIO Syllabus</i> (4.1), Критерий 5 АИОР (п. 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P6	Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области <i>электроэнергетики</i>	Требования ФГОС ВО, СУОС (УК-6 *(ОК-7), УК-7 *(ОК-8)), <i>CDIO Syllabus</i> (2.6), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
По профилям подготовки		
P7	Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчета и анализа <i>электрических устройств, объектов и систем.</i>	Требования ФГОС ВО, СУОС (УК-1 *(ОК-1, ОК-2), УК-2 *(ОК-3, ОК-4), УК-3 *(ОК-5), УК-4 *(ОК-5), ОПК-1, ОПК-2), <i>CDIO Syllabus</i> (1.1), Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> <i>Профессиональные стандарты: 20.003, 20.012, 20.016, 20.030, 20.031, 20.032, 24.014, 25.001, 25.027, 25.038, 25.040, 25.043, 32.001, 32.003, 40.011, 40.037, 40.139, 40.160, 40.179, 40.180</i>
P8	Уметь формулировать задачи в области <i>электроэнергетики</i> , анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.	Требования ФГОС ВО, СУОС (УК-2 *(ОК-3, ОК-4), ОПК-1, ОПК-2, ОПК-3), <i>CDIO Syllabus</i> (2.1), Критерий 5 АИОР (п. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> <i>Профессиональные стандарты: 20.003, 20.012, 20.016, 20.030, 20.031, 20.032, 24.014, 25.001, 25.027, 25.038, 25.040, 25.043, 32.001, 32.003, 40.011, 40.037, 40.139, 40.160, 40.179, 40.180</i>
P9	Уметь проектировать <i>электроэнергетические системы и их компоненты.</i>	Требования ФГОС ВО, СУОС (УК-2*(ОК-3, ОК-4), ПК-3, ПК-4, ПК-9), <i>CDIO Syllabus</i> (4.4), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> <i>Профессиональные стандарты: 20.003, 20.012, 20.016, 20.030, 20.031, 20.032, 24.014, 25.001, 25.027, 25.038,</i>

		25.040, 25.043, 32.001, 32.003, 40.011, 40.037, 40.139, 40.160, 40.179, 40.180
P10	Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния электрооборудования, объектов и систем электроэнергетики, интерпретировать данные и делать выводы.	Требования ФГОС ВО, СУОС (ОПК-2, ОПК-3, ПК-1, ПК-2, ПК-5, ПК-12, ПК-14, ПК-15), <i>CDIO Syllabus</i> (2.2), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> <i>Профессиональные стандарты: 20.003, 20.012, 20.016, 20.030, 20.031, 20.032, 24.014, 25.001, 25.027, 25.038, 25.040, 25.043, 32.001, 32.003, 40.011, 40.037, 40.139, 40.160, 40.179, 40.180</i>
P11	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области электроэнергетики.	Требования ФГОС ВО, СУОС (ОПК-2, ОПК-3, ПК-11, ПК-13, ПК-18), <i>CDIO Syllabus</i> (4.5), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> <i>Профессиональные стандарты: 20.003, 20.012, 20.016, 20.030, 20.031, 20.032, 24.014, 25.001, 25.027, 25.038, 25.040, 25.043, 32.001, 32.003, 40.011, 40.037, 40.139, 40.160, 40.179, 40.180</i>
P12	Иметь практические знания принципов и технологий электроэнергетической отрасли, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях.	Требования ФГОС ВО, СУОС (ОПК-4, ОПК-5, ПК-4, ПК-5, ПК-6, ПК-7, ПК-8 ПК-9, ПК-16, ПК-17), <i>CDIO Syllabus</i> (4.6), Критерий 5 АИОР (п.1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> <i>Профессиональные стандарты: 20.003, 20.012, 20.016, 20.030, 20.031, 20.032, 24.014, 25.001, 25.027, 25.038, 25.040, 25.043, 32.001, 32.003, 40.011, 40.037, 40.139, 40.160, 40.179, 40.180</i>

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 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Отделение Электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

_____ «__» _____ 2019 г. В.В. Шестакова

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
5А5А	Поярко Дмитрий Евгеньевич

Тема работы:

Влияние моделей обратного тока насыщения диода на выходные характеристики двух-диодной модели солнечной батареи в среде Matlab Simulink	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	29.04.2019, № 3412/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2019
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. Д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. Д.).</i></p>	<p>Объектом исследования является солнечная батарея, собранная из определенного числа солнечных элементов.</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Изучение принципа действия солнечного элемента, изучение состава и типов солнечных батарей, солнечных электростанций, описание входных и выходных параметров, формирование уравнения рабочего тока, обзор существующих моделей, выбор оптимальной модели, сбор модели в программном комплексе Matlab, проведение эксперимента с целью исследования влияния модели обратного тока насыщения диода на выходные характеристики солнечной</p>

	батареи.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	1. Вольт-амперные характеристики реальных солнечных батарей; 2. Параметры реальных солнечных батарей; 3. Вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики, полученные входе эксперимента.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Сотникова Анна Александровна
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Потехина Нина Васильевна

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	12.02.19
---	----------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ	Рубан Николай Юрьевич	к.т.н		12.02.19
Ассистент ОЭЭ	Бай Юлий Дмитриевич			12.02.19

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А5А	Поярков Дмитрий Евгеньевич		12.02.19

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5А5А	Поярков Дмитрий Евгеньевич

Школа	ИШЭ	Отделение	ОЭЭ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	13.03.02 «Электроэнергетика и Электротехника»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость материальных ресурсов определялась по средней стоимости по г. Томску. Оклад руководителя - 21760 руб. Оклад инженера – 21760 руб.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>- 16% накладные расходы; - 30% районный коэффициент; - норма амортизации 33,3%</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Размер страховых взносов 30%.</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Анализ конкурентоспособности технического решения. SWOT- анализ технического решения.</i>
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Планирование: - формирование структуры работ; - утверждение участников работ каждого типа; - определение продолжительности работ; - формирование графика проведения работ. Определение бюджета на разработку проекта: - материальных затраты; - амортизационные отчисления; - заработная плата исполнителей (основная и дополнительная); - отчисления во внебюджетные фонды; - накладные расходы.</i>
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Определение потенциального эффекта</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. *Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок*
2. *Матрица SWOT-анализа*
3. *График Ганта*
4. *Бюджет затрат на НИИ*

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель ОСГН ШБИП	Потехина Н.В.			12.02.19

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А5А	Поярков Дмитрий Евгеньевич		12.02.19

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5А5А	Поярков Дмитрий Евгеньевич

Школа	ИШЭ	Отделение	ООЭ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	13.03.02 «Электроэнергетика и Электротехника»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования	Объектом исследования является солнечный элемент
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	- Специальные правовые нормы трудового законодательства; - Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.
2. Производственная безопасность	- Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать солнечный элемент; - Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований; - Мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.
3. Экологическая безопасность:	- Влияния солнечного элемента на окружающую среду; - Анализ «жизненного цикла» солнечного элемента - Мероприятия по защите окружающей среды.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	- ЧС, которые может инициировать солнечный элемент; - ЧС, которые могут при проведении исследований - Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Сотникова Анна Александровна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А5А	Поярков Дмитрий Евгеньевич		

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

Инженерная школа энергетике

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Уровень образования: бакалавр

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Период выполнения: осенний / весенний семестр 2018 /2019 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2019
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
05.03.19	Обзор литературы	20
02.04.19	Обзор и выбор модели для исследования	20
23.04.19	Сбор модели и её верификация	20
21.05.19	Экспериментальная часть	20
22.05.19	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
25.05.19	Социальная ответственность	10
		100

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ	Рубан Юлий Дмитриевич	к.т.н.		

Консультант ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЭЭ	Бай Юлий Дмитриевич			

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ	Шестакова Вера Васильевна.	к.т.н., доцент		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 82 страницы, 46 рисунка, 17 таблиц, 24 источника.

Ключевые слова: солнечный элемент, солнечная батарея, солнечная электростанция, фотоэлектрическая система, освещенность, фототок, обратный ток насыщения диода, модель, вольт-амперная характеристика, вольт-ваттная характеристика.

Объектом исследования является солнечная батарея, собранная из определенного числа солнечных элементов.

В ходе ВКР проводилось моделирование солнечной батареи в программном обеспечении MATLAB. Изучались выходные параметры солнечной батареи в зависимости от модели обратного тока насыщения диода. Полученными результатами являются вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики, показывающие влияние модели обратного тока насыщения диода на выходные параметры солнечной батареи.

Результаты данной работы могут быть использованы при проектировании солнечных электростанций для оценки эффективности работы фотоэлектрических систем, прогнозирование возможной мощности солнечных батарей из различных материалов и оценки влияния модели обратного тока насыщения диода на выходные параметры, то есть для определения оптимального режима работы.

Сокращения

СЭ – солнечный элемент;

СБ – солнечная батарея;

СЭС – солнечная электростанция;

ВАХ – вольт-амперная характеристика;

ВВХ – вольт-ваттная характеристика;

КПД – коэффициент полезного действия;

ЧС – чрезвычайная ситуация;

ЭДС – электродвижущая сила

Оглавление

Введение.....	13
1 Обзор литературы.....	17
1.1. Состав оборудования солнечной электростанции.....	17
1.2 Конструкция и принцип работы солнечного элемента.....	19
1.3 Классификация солнечных элементов.....	21
1.4 Выходные параметры.....	25
1.5 Входные параметры.....	27
2 Объект и методы исследования.....	30
2.1 Формирование отдельных составляющих уравнения рабочего тока для различных моделей солнечного элемента.....	30
2.2 Сбор модели в среде Matlab Simulink.....	34
2.3 Верификация модели.....	38
3 Оценка влияния модели обратного тока насыщения на выходные параметры солнечного элемента.....	44
3.1 Влияние фактора идеализации диода на выходную ВАХ солнечного элемента.....	44
3.2 Влияние учёта температурного коэффициента на выходную ВАХ солнечного элемента.....	49
4 Результаты исследования.....	54
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	55
5.1 Анализ конкурентных технических решений.....	56
5.2 SWOT-анализ.....	56
5.3 Планирование научно-исследовательских работ.....	58
5.3.1 Структура работ в рамках научного исследования.....	58
5.3.2 Трудоемкость выполнения работ.....	58
5.3.3 График проведения научного исследования.....	59
5.4 Бюджет научно-технического исследования.....	63
5.4.1 Материальные затраты	63
5.4.2 Затраты на амортизацию.....	64
5.4.3 Основная заработная плата исполнителей.....	64
5.4.4 Дополнительная заработная плата исполнителей.....	65
5.4.5 Отчисления во внебюджетные фонды.....	66

5.4.6 Накладные расходы.....	66
5.4.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.....	67
5.5 Описание потенциального эффекта.....	67
6 Социальная ответственность.....	69
6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности...	70
6.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства.....	70
6.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.....	71
6.2 Производственная безопасность.....	72
6.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать солнечный элемент.....	72
6.2.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.....	73
6.2.3 Мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.....	75
6.3 Экологическая безопасность.....	76
6.3.1 Влияния солнечного элемента на окружающую среду.....	76
6.3.2 Анализ «жизненного цикла» солнечного элемента.....	77
6.3.3 Мероприятия по защите окружающей среды.....	77
6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	78
6.4.1 ЧС, которые может инициировать солнечный элемент.....	78
6.4.2 ЧС, которые могут при проведении исследований.....	78
6.4.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.....	79
Заключение.....	80
Список использованных источников.....	81

Введение

В настоящее время, большая часть электрической энергии производится с помощью невозобновляемых ресурсов. Запасы данного вида ресурсов постепенно истощаются, например, при настоящем уровне потребления разведанных запасов нефти в мире осталось примерно на 53 года. В связи с этим, доля электроэнергии, которую вырабатывают с помощью альтернативных источников энергии увеличивается, в частности, электроэнергии, произведенной с помощью солнечной энергии.

Выработка электроэнергии на солнечных электростанциях в мире развивается с темпами роста превышающими 30 процентов. Лидерами по количеству выработанной энергии на солнечных электростанциях являются Германия, Италия, Китай, США и Япония. Доля данной электроэнергии в общей выработке электроэнергии составляет 2%.



Рисунок 1 – Объём электроэнергии, выработанной на СЭС за год в мире

В России доля электроэнергии, произведённой солнечными и ветровыми электростанциями, составляет 0,1% от общей генерируемой электроэнергии в

стране. Самой мощной солнечной электростанцией является Орская СЭС суммарной мощностью 40 МВт.

Однако, территория нашей страны обладает огромным потенциалом для использования солнечной энергии особенно регионы Дальнего Востока, Южной Сибири и Кавказа. В связи с этим, правительством Российской Федерации была разработана стратегия развития солнечной энергетики, которая предполагает рост объёма генерации электроэнергии на СЭС до 1,5-2% от общего объёма генерации электроэнергии. Так, например, к 2022 году в республике Бурятия запланирован ввод в эксплуатацию четырёх СЭС общей мощностью 100 МВт.

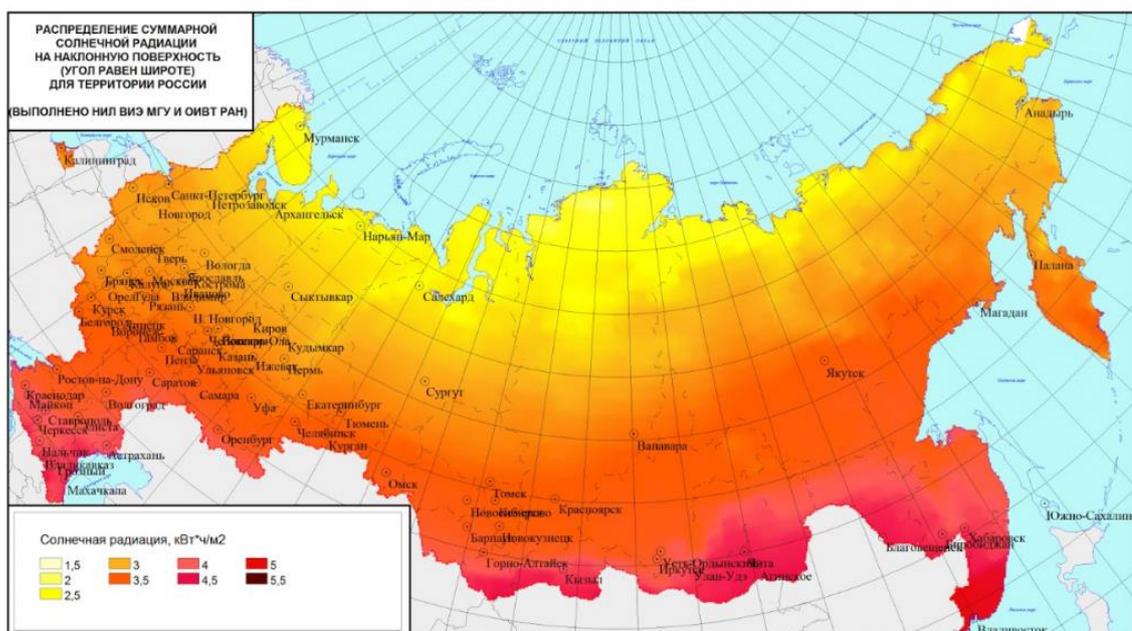


Рисунок 2 – Распределение солнечной радиации на территории РФ

В связи с выше обозначенными планами внедрения всё большего количества солнечных электростанций моделирование солнечных элементов становится актуальным вопросом. Моделирование солнечных элементов помогает решать такие основные задачи, как:

- Определение выходных параметров солнечного элемента (моделирование ВАХ):

- Определение оптимальной рабочей точки солнечного элемента в зависимости от изменения освещенности и температуры; а это же автоматикой делается, при чем тут работа?

- Определение влияния затенения солнечного элемента:

- Определение схемных потерь (т.е. потерь энергии, которая идёт на нагрев солнечного элемента).

В результате решения данного перечня задач, возможно принять необходимые меры для наиболее оптимального и эффективного использования солнечного элемента, т.е. получение наибольшего КПД.

Основной проблемой моделирования солнечного элемента является то, что не существует универсальной модели солнечного элемента, которая достаточно точно описывает процессы происходящие, при различных значения освещенности, температуры и других изменяющихся параметров.

Это связано с тем, что процессы, происходящие в солнечном элементе, в виду их сложности, описываются в упрощённом виде. Например, выражение для определения величины обратного тока насыщения диода солнечного элемента включает в себя эмпирический безразмерный коэффициент (фактор идеализации ВАХ диода), который описывает такие сложные процессы, как рекомбинация, шунтирование и другие процессы в р-п переходе.

Влияние модели обратного тока насыщения диода в наименьшей степени представлено в различной литературе. В связи с этим, в данной работе будет рассмотрен вопрос влияния модели обратного тока насыщения диода модели солнечного элемента на выходную вольт-амперную характеристику. Следовательно, целью данной работы является:

- Оценка влияния модели обратного тока насыщения диода на вольт-амперную характеристику солнечного элемента.

Для того чтобы достичь данную цель были выполнены следующие задачи:

- Сбор и анализ различных источников информации;
- Сравнение различных типов моделей;

- Сравнение выходных характеристик для разных моделей;
- Определение типа модели солнечного элемента, который необходим для реализации поставленных целей;
- Создание математической модели в программном комплексе Matlab и получение выходных параметров смоделированного солнечного элемента;
- Верификация модели на примере солнечной батареи Shell SQ150-PC и Kyocera SC200GT;
- Получение экспериментальных данных выходных параметров исследуемого солнечного элемента;
- Сравнение результатов эксперимента и с реальными характеристиками и подведение итогов работы.

Как правило в работах, которых рассматривается моделирование солнечного элемента, используется одна определённая модель обратного тока насыщения диода и не оценивается влияние вида модели на выходные параметры солнечного элемента. В данной работе будет рассматриваться две модели обратного тока насыщения диода и их влияние на выходные параметры солнечного элемента.

1 Обзор литературы

1.1 Состав оборудования солнечной электростанции

Солнечные фотоэлектрические станции представляют собой вид электростанций, выработка электричества которыми основана на преобразовании солнечной энергии в электрическую.

Солнечные фотоэлектрические станции подразделяются на два вида [1]:

- Автономные (малой мощности);
- Работающие параллельно с сетью (большой мощности).

Особенностью автономных СЭС является отсутствие связи с объединённой электрической сетью. Данный вид электростанций из-за особенности в эксплуатации, как правило, не является объектом исследования в области моделирования.

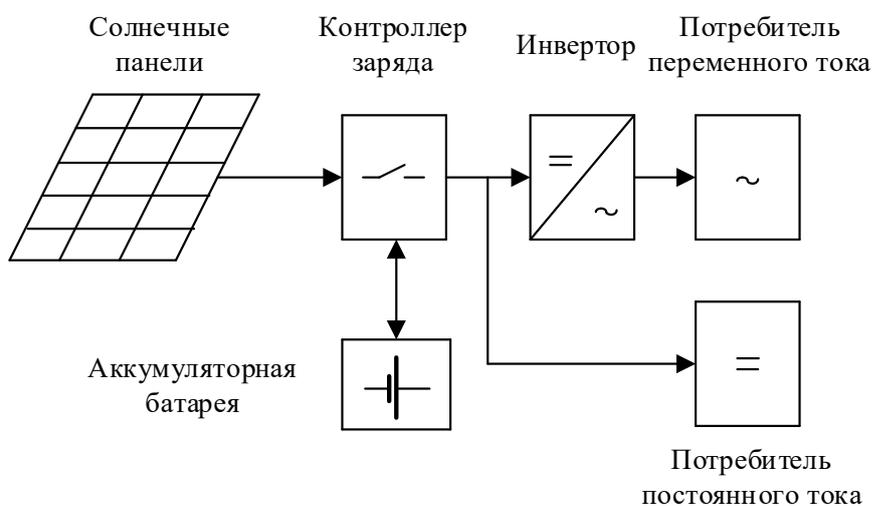


Рисунок 3 – Схема автономной СЭС

Работает данная схема следующим образом: солнечная панель вырабатывает постоянный электрический ток, который в зависимости от нагрузочного режима с помощью контроллера заряда либо заряжает аккумуляторную батарею, либо питает инвертор и потребитель постоянного

тока. Инвертор преобразует постоянный ток в переменный и выдаёт его на потребителей переменного тока.

Недостатками данного типа солнечной электрической станции являются:

- Частая замена аккумуляторных батарей из-за относительно небольшого количества рабочих циклов аккумуляторов;
- Достаточно высокая стоимость аккумуляторных батарей;
- Потери при заряде-разряде аккумуляторов, увеличивающиеся по мере их старения;
- Потери в режиме малых нагрузок.

Наиболее распространённым типом солнечной станции большой мощности является СЭС работающая параллельно с сетью.

Они в свою очередь делятся на два типа [1]:

- с аккумуляторными батареями;
- без аккумуляторных батарей (рисунок 4);

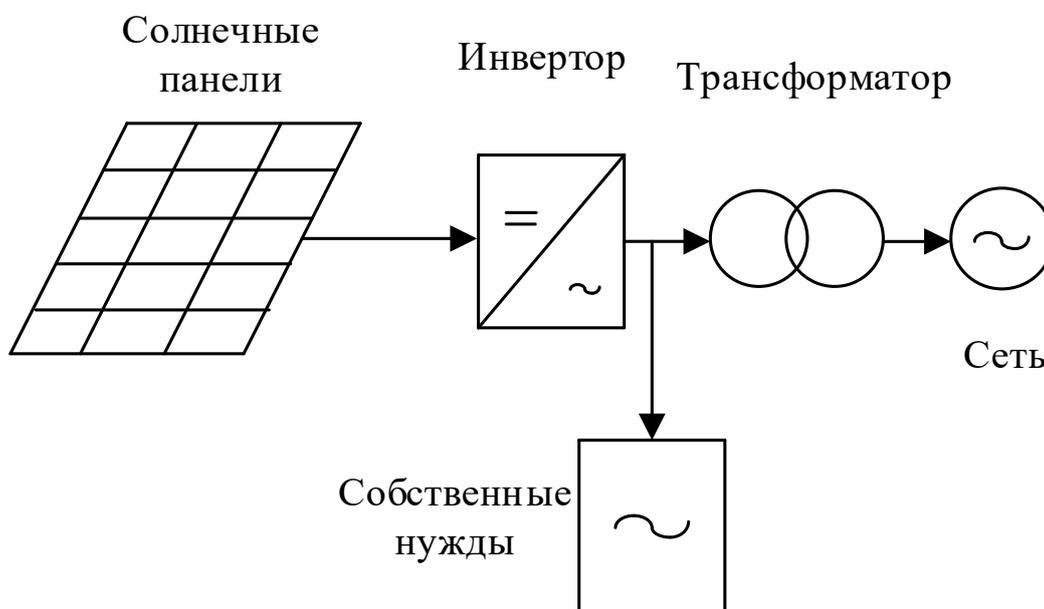


Рисунок 4 – Схема безаккумуляторной СЭС

В данной схеме в качестве опорного сигнала используется сигнал сети. В связи с этим, основным недостатком данной схемы является то, что при

потере напряжения сети, пропадает питание потребителей, так как перестаёт функционировать инвертор.

1.2 Конструкция и принцип работы солнечного элемента

Рассмотрим конструкцию и принцип работы солнечного элемента. Солнечный элемент представляет собой полупроводниковое устройство, которое преобразует энергию солнечного излучения в электрическую энергию.

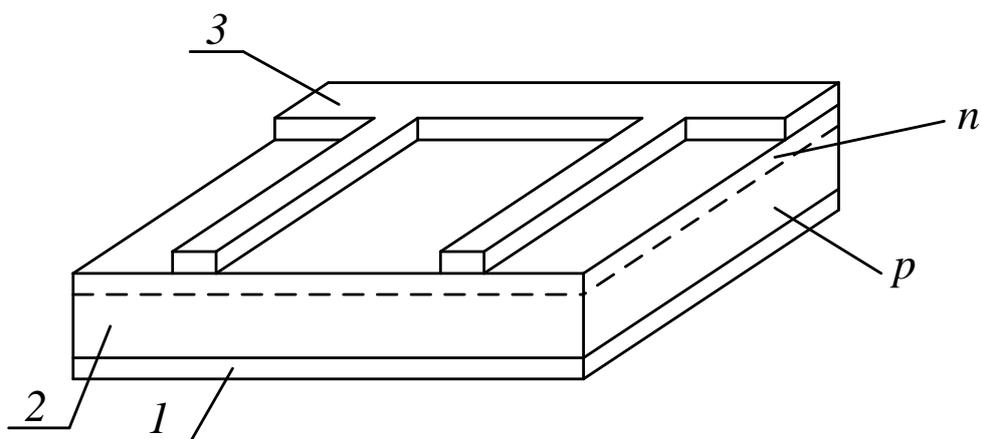


Рисунок 5 – Схема солнечного элемента с p-n переходом. 1 – Тыльный контакт; 2 – Полупроводниковая структура; 3 – Передняя контактная сетка

Формирование солнечного элемента начинается с создания полупроводникового монокристаллического слитка с необходимым типом проводимости. Для этого плавят исходный полупроводниковый материал, в качестве которого часто выступает кремний, добавляя в расплав определённое количество примеси. В зависимости от того какого типа кремний нам надо получить n-типа или p-типа в качестве примесей применяют элементы V группы таблицы Менделеева, например фосфор, и элементы III группы, например бор, соответственно.

Затем в поверхностный слой легированного слитка кремния путем термодиффузии вводят примесь, концентрация которой значительно выше,

чем концентрация примеси в базовом материале. Данная примесь служит для того, чтобы изменить знак проводимости на противоположный.

Изготовление солнечного элемента заканчивается созданием металлических контактов на полупроводниковых слоях, а также нанесение просветляющих и тепло регулирующих покрытий [2].

Эффективной работы солнечного элемента зависит от свойств р-n-перехода, поэтому подробнее рассмотрим физические процессы, происходящие в переходе.

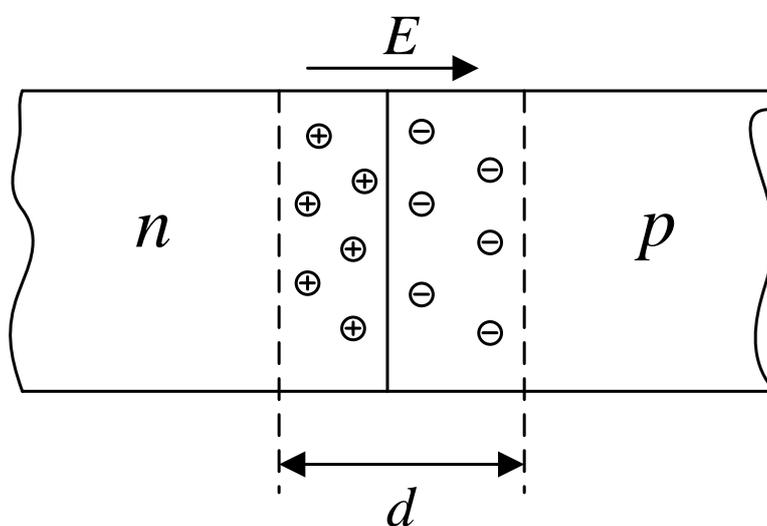


Рисунок 6 – Схема р-n перехода

В следствие того, что в полупроводнике n-типа основных носителей заряда (электронов) во много раз больше, чем в проводнике р-типа, и в проводнике р-типа основных носителей заряда (дырок) во много раз больше, чем в проводнике n-типа, через границу раздела полупроводников с разными типами проводимости происходит диффузия электронов из полупроводника n-типа в полупроводник р-типа и дырок в обратном направлении. Электроны рекомбинируют с дырками в полупроводнике р-типа, а дырки с электронами в полупроводнике n-типа при этом нейтрализуя друг друга, что приводит к образованию uncompensated объемных зарядов.

Данные заряды формируют объединённую зону с толщиной d (рисунок б). Электрическое поле E р-n-перехода, созданное объёмными зарядами, препятствует диффузии основных носителей. Данный слой принято называть потенциальным барьером.

При попадании солнечной энергии на поверхность солнечного элемента происходит поглощение данной энергии. Данное поглощение сопровождается образованием электронно-дырочных пар. Образовать электронно-дырочную пару, т.е. разорвать ковалентную связь, могут лишь фотоны имеющую энергию равную или превышающую величину ширины запрещенной зоны [3]:

$$\frac{h \cdot c}{\lambda} \geq E_g \quad (1),$$

где h - постоянная Планка;

c - скорость света в вакууме;

λ - длина волны солнечного излучения;

E_g - ширина запрещенной зоны.

Стоит отметить, что фотоны с энергией, превышающей ширину запрещенной зоны усиливают колебания кристаллической решётки полупроводника, что приводит к выделению энергии в виде тепла.

В результате образования электронно-дырочных пар на границе раздела полупроводников с разными типами проводимости формируется uncompensated заряд, в полупроводнике n-типа положительный, а в полупроводнике p-типа отрицательный. В следствие этого, возникает разность потенциалов, благодаря которой вырабатывается постоянный электрический ток.

1.3 Классификация солнечных элементов

Солнечные элементы классифицируются в зависимости от материала, из которого они изготовлены (рисунок 7) [4].

Основным материалом, на основе которого изготавливаются солнечные элементы, является кремний. Порядка 85% рынка представляют собой

солнечные элементы на основе кремния [5]. В процессе развития технологий связанных с изготовления солнечных элементов, их КПД изменилось с 10 до 23-24%. Кремниевые солнечные элементы бывают монокристаллическими и поликристаллическими.

Монокристаллические кремниевые солнечные элементы имеют относительно высокий КПД – это является их основным преимуществом. Недостатками данного типа солнечных элементов является то, что изготовление монокристалла является очень дорогим и технологически сложным процессом.

В связи с недостатками монокристаллических кремниевых солнечных элементов, применяю поликристаллические кремниевые солнечные элементы. Их цена значительно ниже, однако, такие элементы, как правило, имеют более низкий КПД.

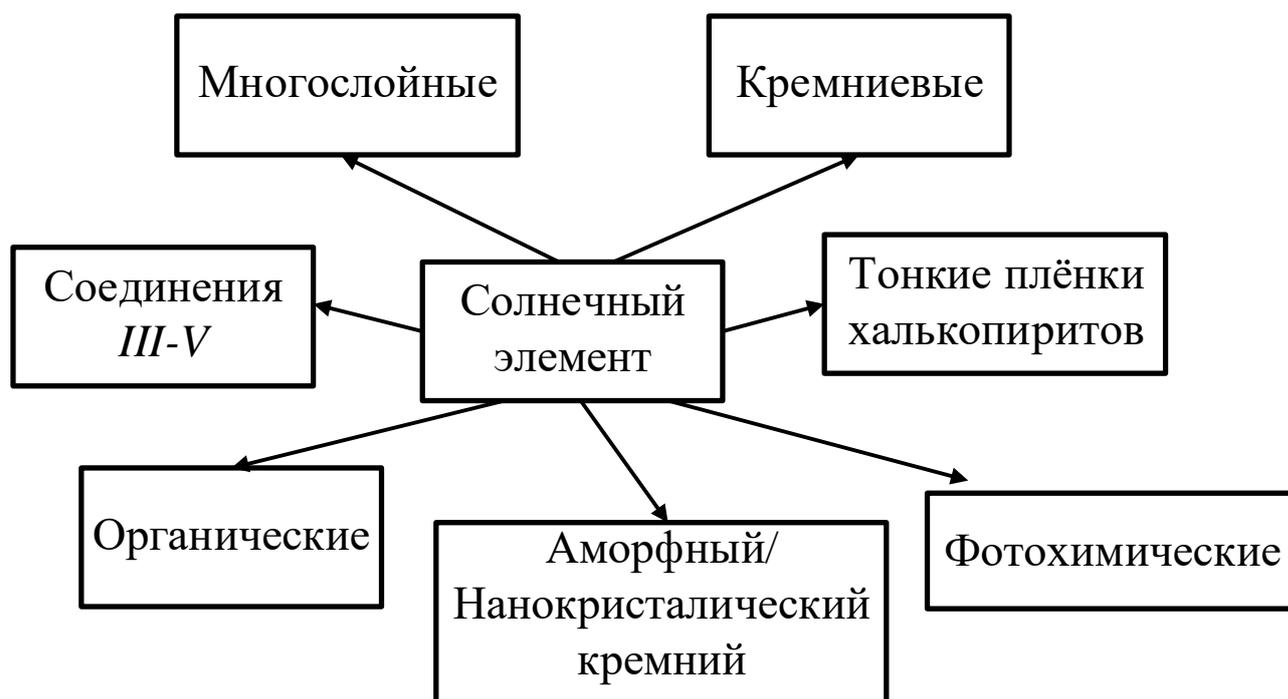


Рисунок 7 – Классификация солнечных элементов

На данный момент, наиболее перспективным считается развитие в области производства солнечных элементов на основе GaAs. Данный тип

солнечных элементов относится к солнечным батареям на основе соединения элементов III и V группы таблицы Менделеева. Основным достоинством данного типа элементов является то, что при увеличении температуры наблюдается лишь незначительное снижение КПД. Ещё одним достоинством является радиационная стойкость таких солнечных элементов.

Недостатками данного типа панелей является высокая стоимость исходного материала и технологии изготовления. По этой причине производство данного типа солнечных элементов сосредоточено на космическом применении.

Также существуют солнечные элементы на основе аморфного кремния. В данном типе солнечных элементов используется тонкая плёнка a-Si:H толщиной до 1 мкм, которая заменяет дорогостоящие кремниевые подложки толщиной 300 мкм. Это возможно за счёт того, что поглощение аморфного кремния в 20 раз выше, чем у кристаллического [6]. Использование аморфного кремния исключает операции шлифовки, резки и полировки. На данный момент КПД солнечных элементов на основе аморфного кремния несколько ниже, чем у солнечных элементов на основе кристаллического кремния.

Органические солнечные элементы изготавливаются на основе органических полимеров. Основным достоинством этого вида солнечных элементов является дешевизна исходного материала. Существенный недостаток этих элементов заключается в том, что они имеют самый низкий КПД.

Фотохимические солнечные элементы производятся на основе органических красителей. В краситель помещается полупроводниковый электрод. При освещении установки электроны из органического красителя переходят в электрод. КПД такой установки несколько выше, чем у органических солнечных элементов.

В основе многослойных солнечных элементов лежит наноструктурированные материалы, то есть толщина слоев составляет один или несколько атомов. Данный тип солнечных элементов имеет высокий КПД

и является самым лёгким, что очень перспективно для применения данных солнечных элементов в конструкциях солнечных кораблей. Также данный тип требует небольшое количество исходного материала. Недостатком многослойных солнечных элементов является то, что слабо развита промышленность в области получения наноструктурированных материалов.

Таблица 1 - Коэффициент фотоэлектрического преобразования СЭ [7].

Тип солнечного элемента	Коэффициент фотоэлектрического преобразования, %
Кремниевые солнечные батареи	
Si (кристаллический)	24,8
Si (поликристаллический)	20,1
Si (тонкопленочная передача)	16,7
Si (тонкопленочный субмодуль)	10,3
Солнечные батареи на основе соединения элементов III и V группы	
GaAs (кристаллический)	24,9
GaAs (тонкоплёночный)	24,6
GaAs (поликристаллический)	18,1
InP (кристаллический)	22,1
Тонкие пленки халькогенидов	
CIGS (фотоэлемент)	20,1
CIGS (субмодуль)	16,7
CdTe (фотоэлемент)	16,4
Солнечные батареи на основе аморфного/ нанокристаллического кремния	
Si (аморфный)	9,3
Si (нанокристаллический)	10,3
Фотохимические солнечные батареи	
На базе органических красителей	10,2
На базе органических красителей (субмодуль)	7,9
Органические солнечные батареи	
Органический полимер	5,2
Многослойные солнечные батареи	
GaInP/GaAs/Ge	32,1
GaInP/GaAs	30,1
GaInP/CIS (тонкоплёночный)	26,1
a-Si/mc-Si (тонкий субмодуль)	11,9

1.4 Выходные параметры

Рассмотрим выходные параметры, которые получают при моделировании солнечных элементов:

- Вольт-амперная характеристика $I(U)$ солнечного элемента. Как правило рассматривают часть вольт-амперной характеристики, которая находится в первом квадранте (рисунок 8).

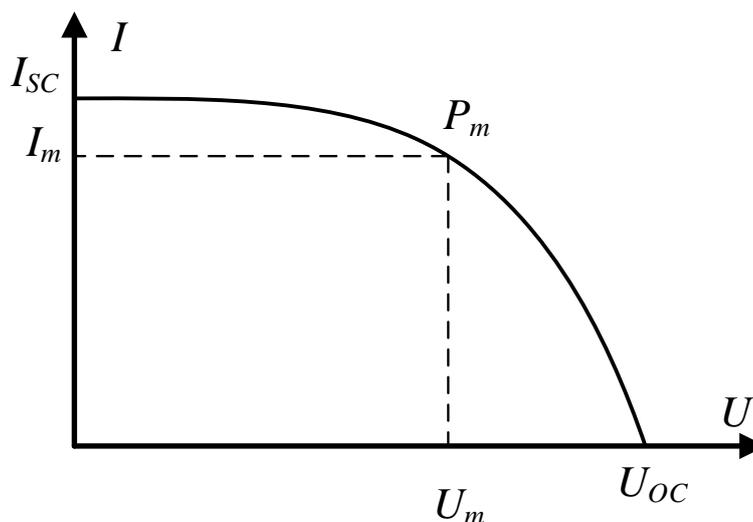


Рисунок 8 – Вольт-амперная характеристика солнечного элемента

где I_{sc} - ток короткого замыкания;

U_{oc} - напряжения холостого хода;

P_m - максимальная мощность солнечного элемента;

U_m , I_m - напряжение и ток, соответствующие точке максимальной мощности [6].

Вольт-амперная характеристика служит для определения оптимального режима работы солнечного элемента и определения параметров рабочего режима.

- Коэффициент заполнения $k_{зан.}$:

$$k_{зан.} = \frac{U_m \cdot I_m}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2);$$

Коэффициент заполнения показывает насколько вольт-амперная характеристика солнечного элемента отличается от прямоугольной. С понижением температуры коэффициент заполнения возрастает. При значениях данного коэффициента $k_{зан.} \geq 0,7$ солнечный элемент считается эффективным[6].

- Коэффициент полезного действия солнечного элемента:

$$\eta = \frac{U_m \cdot I_m}{P_{вход.}} = k_{зан.} \cdot \frac{U_{OC} \cdot I_{SC}}{E \cdot S} \quad (3);$$

где $P_{вход.}$ - мощность излучения падающего на солнечный элемент;

E - освещённость солнечного элемента;

S - площадь солнечного элемента.

Коэффициент полезного действия солнечного элемента помогает оценить эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую энергию с помощью исследуемого солнечного элемента.

- Вольт-ваттная характеристика солнечного элемента. Аналогично вольт-амперной характеристике рассматривается часть характеристики, которая находится в первом квадранте координатной плоскости (рисунок 9).

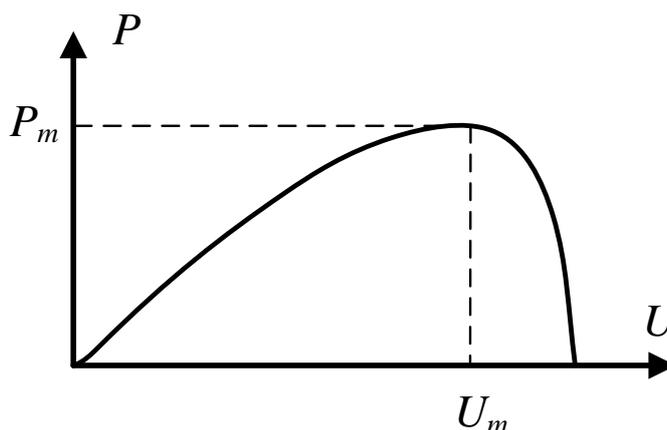


Рисунок 9 – Вольт-ваттная характеристика солнечного элемента

Аналогично вольт-амперной характеристике, вольт-ваттная характеристика служит для определения оптимального режима работы

солнечного элемента и определения параметров рабочего режима. Также вольт-ваттная характеристика помогает в прогнозировании количества выработанной электроэнергии в рассматриваемый период.

1.5 Входные параметры

Рассмотрим входные параметры, которые необходимы при моделировании солнечных элементов:

- Освещённость солнечного элемента E .

Освещённость – это величина, которая показывает какое количество световой энергии приходится на площадь равную 1 м^2 . При уменьшении уровня освещённости солнечного элемента снижается ток короткого замыкания, а также снижается ток, соответствующий точке максимальной мощности.

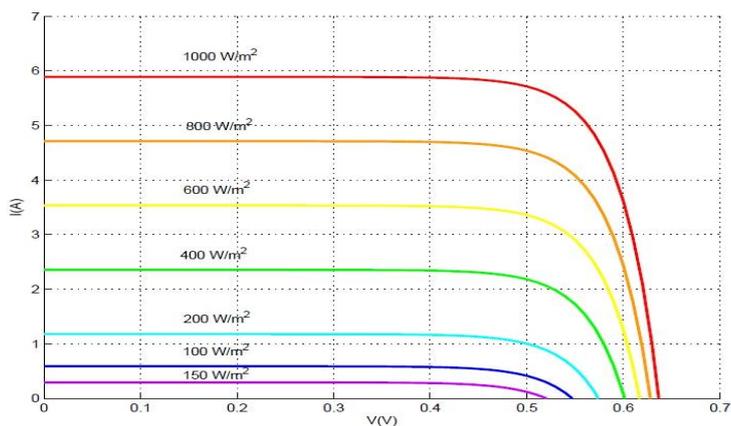


Рисунок 10 – Влияние уровня освещённости на ВАХ солнечного элемента [8]

- Температура солнечного элемента T .

Изменение температуры солнечного элемента оказывает значительное влияние на напряжение холостого хода и на напряжение

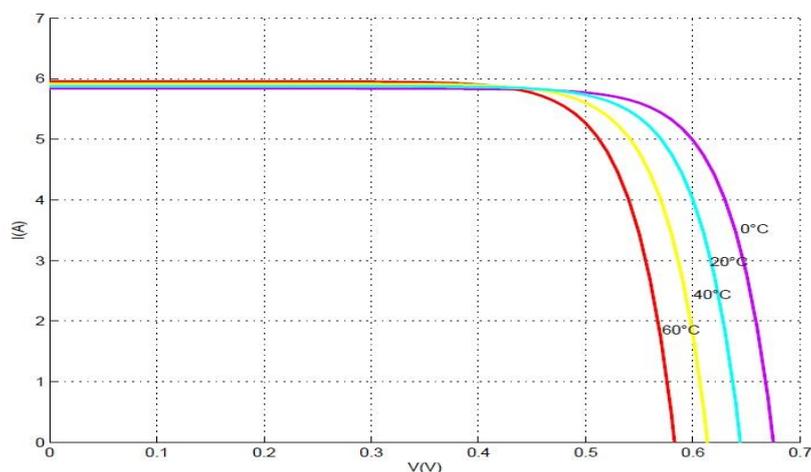


Рисунок 11 – Влияние температуры на ВАХ солнечного элемента [8]

- Последовательное сопротивление R_s .

Последовательное сопротивление характеризует рассеивание энергии в виде тепла при прохождении тока через р-п переход [8]. Влияние последовательного сопротивления на ВАХ солнечного элемента представлено на рисунке 12.

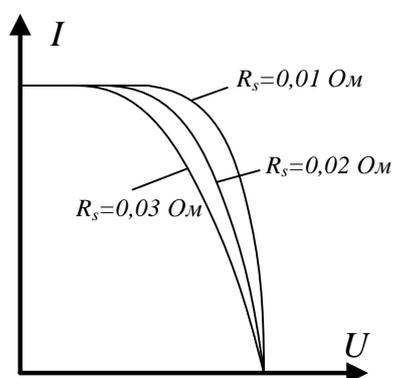


Рисунок 12 – Влияние последовательного сопротивления на ВАХ солнечного элемента [9]

- Шунтирующие R_{sh} сопротивление солнечного элемента.

Шунтирующие сопротивление характеризует дефекты и примеси полупроводникового материала, который используется в солнечном элементе[12].

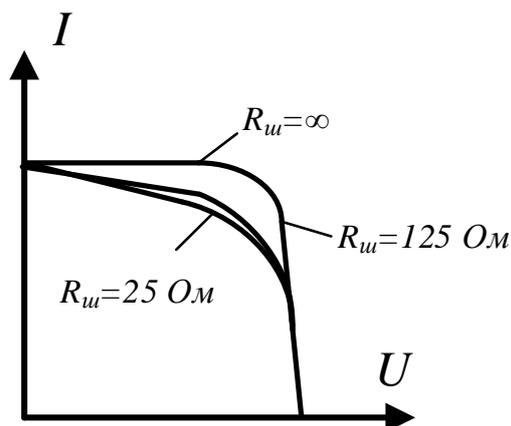


Рисунок 13 – Влияние шунтирующего сопротивления на ВАХ солнечного элемента [9]

Стоит отметить, что в зависимости от целей моделирования и вида материала данными сопротивлениями возможно пренебрегать. Погрешность, которую может ввести данное пренебрежение, лежит в пределах 0,5-20% [10].

- Фактор идеализация диода n .

Данная величина получается при сравнении теоретической ВАХ и экспериментальной ВАХ. Различие экспериментальной и теоретической вольтамперной характеристикой связано с процессами, протекающими в р-п-переходе, которые не учитываются в моделях.

Таблица 2 - Значения фактора идеализации диода от материала СЭ[6]

Материал	n
Монокристаллический Si	1,2
Поликристаллический Si	1,3
a-Si:H ($E_g=1,7$ эВ)	1,8
a-Si:H тандемные	3,3
a-Si:H тройные	5
CdTe ($E_g=1,45$ эВ)	1,5
CIGS ($E_g=1,38$ эВ)	1,5-1,6
GaAs ($E_g=1,43$ эВ)	1,3

2 Объект и методы исследования

2.1 Формирование отдельных составляющих уравнения рабочего тока для различных моделей солнечного элемента

Стоит отметить, что не существует универсальной модели солнечного элемента, которая корректно описывает солнечный элемент в различных условиях работы (т.е. при различных входных параметрах). Существует несколько моделей, которые используются в зависимости от целей и условий моделирования.

Для начала рассмотрим уравнение рабочего тока на основе модели, включающий в себя 1 диод (рисунок 14).

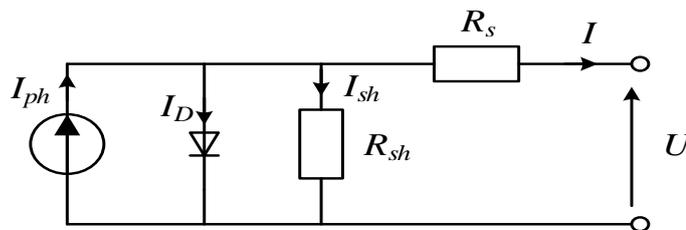


Рисунок 14 – Одна-диодная модель солнечного элемента

- Фототок I_{ph} .

Величина фототока пропорциональная освещенности солнечного элемента [11]:

$$I_{ph} = \frac{E}{E_s} \cdot I_{SGS} + \alpha_{SCT} \cdot (T - T_s) \quad (4);$$

где T - температура солнечного элемента, в исследуемом режиме;

T_s - температура батареи при стандартных условиях, как правило, принимается равной $25\text{ }^\circ\text{C}$;

E - освещённость солнечного элемента при температуре T ;

E_s - освещённость солнечного элемента при температуре T_s ;

I_{SGS} - ток короткого замыкания солнечного элемента при температуре T_s ;

α_{SGT} - температурный коэффициент тока короткого замыкания, который показывает насколько изменяется ток короткого замыкания при изменении температуры солнечного элемента на 1 $^{\circ}\text{C}$.

В результате дефектов и примесей в полупроводнике возникает ток утечки I_{sh} . Это ток определяется с помощью второго закона Кирхгофа:

$$I_{sh} = \frac{U + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (5).$$

- Ток диода I_D .

Выражение для определения тока диода [11]:

$$I_D = I_0 \cdot \left[\exp\left(q \cdot \frac{U + R_s \cdot I}{n \cdot T \cdot k} \right) - 1 \right] \quad (6);$$

где $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл - заряд электрона;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ - постоянная Больцмана;

где I_0 - обратный ток насыщения диода;

В случае исследования одна-диодной модели обратный ток насыщения неосвещенного диода зависит от температуры и рассчитывается по выражению [10]:

$$I_0 = I_{RS} \cdot \left(\frac{T}{T_S} \right)^{\frac{3}{n}} \cdot \exp\left[\frac{q \cdot E_G}{n \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{T_S} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (7);$$

где I_{RS} - обратный ток насыщения диода при стандартных условиях;

E_G - ширина запрещённой энергетической зоны полупроводника (определяется типом используемого СЭ), для кремния $E_G = 1,12$ В.

Величину обратного тока насыщения I_{RS} приближенно [10] можно найти по величине напряжения холостого хода U_{oc} элемента, измеренного при базовом значении температуры ячейки T_S , по выражению:

$$I_{RS} = I_{SC} / \left(\exp\left(\frac{q \cdot U_{oc}}{k \cdot n \cdot T_S} \right) - 1 \right) \quad (8);$$

В результате с помощью первого закона Кирхгофа можно получить уравнение для рабочего тока солнечного элемента:

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (9);$$

Подставим ранее полученные выражение:

$$I = \frac{E}{E_s} \cdot I_{SCS} + \alpha_{SCT} \cdot (T - T_s) - I_0 \cdot \left[\exp\left(q \cdot \frac{U + R_s \cdot I}{n \cdot T \cdot k} \right) - 1 \right] - \frac{U + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (10).$$

Данное выражение является математической моделью солнечного элемента.

Теперь рассмотрим модель, которая включает в себя 2 диода (рисунок 15). Данная модель точнее описывает физические процессы, происходящие в р-п-переходе, за счёт этого с помощью данной модели можно получить более близкую к реальной вольтамперной характеристике в более широком диапазоне температур и уровней освещённости.

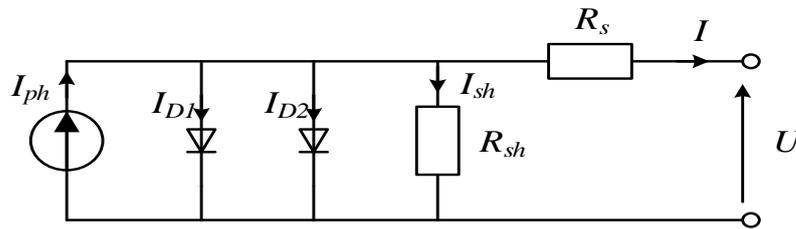


Рисунок 15 – Двух-диодная модель солнечного элемента

Запишем с помощью первого закона Кирхгофа уравнение для рабочего тока солнечного элемента:

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_{sh} \quad (11);$$

$$I = I_{ph} - I_{01} \cdot \left[\exp\left(q \cdot \frac{U + R_s \cdot I}{n_1 \cdot T \cdot k} \right) - 1 \right] - I_{02} \cdot \left[\exp\left(q \cdot \frac{U + R_s \cdot I}{n_2 \cdot T \cdot k} \right) - 1 \right] - I_{sh} \quad (12).$$

где I_{01} - обратный ток насыщения, связанный с диффузионным явлением;

I_{02} - обратный ток насыщения, связанный с явлением рекомбинации;

В данном уравнении слагаемое I_{D1} учитывает протекающий ток через неидеальный p-n-переход, а слагаемое I_{D2} учитывает рекомбинацию в области объёмного заряда. Фактор идеализации n_2 согласно теории Шокли-Рида-Холла принимается $n_2 = 2$ [9]. Фактор идеализации n_1 определяется по экспериментальным данным, либо принимается $n_1 = 1$ [8].

Уравнение обратного тока насыщения применимо к модели на двух диодах [12]:

$$I_{01} = I_{02} = \frac{I_{SC} + \alpha_{SCT} \cdot (T - T_S)}{\exp\left[U_{OC} + \beta_{SCT} \cdot (T - T_S) / \{(n_1 + n_2)/p\} \cdot U_T\right] - 1} \quad (13);$$

где β_{SCT} – температурный коэффициент напряжения холостого хода СЭ;
 $U_T = \frac{k \cdot T}{q}$ – термо-ЭДС соответствующего диода.

Несмотря на то, что с данной моделью возможно достижение максимальной точности ВАХ, она является самой ресурсозатратной с точки зрения вычислений.

Для моделирование солнечной батареи необходимо учитывать тип соединения солнечных элементов. Для этого в уравнение (12) и (13) необходимо ввести коэффициенты N_S (число последовательно соединенных элементов) и $N_P N_S$ (число параллельно соединенных элементов):

$$I = I_{ph} \cdot N_P - I_{01} \cdot N_P \cdot \left[\exp \left(q \cdot \frac{U + R_s \cdot \left(\frac{N_S}{N_P} \right) \cdot I}{n_1 \cdot T \cdot k \cdot N_S} \right) - 1 \right] -$$

$$- I_{02} \cdot N_P \cdot \left[\exp \left(q \cdot \frac{U + R_s \cdot \left(\frac{N_S}{N_P} \right) \cdot I}{n_2 \cdot T \cdot k \cdot N_S} \right) - 1 \right] - \frac{U + R_s \cdot \left(\frac{N_S}{N_P} \right) \cdot I}{R_{sh} \cdot \left(\frac{N_S}{N_P} \right)} \quad (14);$$

$$I_{01} = I_{02} = \frac{I_{SC} + \alpha_{SCT} \cdot (T - T_S)}{\exp\left[U_{OC} + \beta_{SCT} \cdot (T - T_S) / \{(n_1 + n_2) / p\} \cdot U_T \cdot N_S\right] - 1} \quad (15).$$

2.2 Сбор модели в среде Matlab Simulink

Моделирование было произведено на базе программы Matlab Simulink. Была собрана модель солнечного элемента на основе однодиодной схемы замещения (10) с уравнением обратного тока насыщения диода (7). Также была собрана модель солнечного элемента на основе двухдиодной схемы замещения с уравнением (12) для обратного тока насыщения диода.

По уравнению (4), с учётом конфигурации солнечных элементов в батарее, была собрана модель фототока солнечного элемента (рисунок 16).

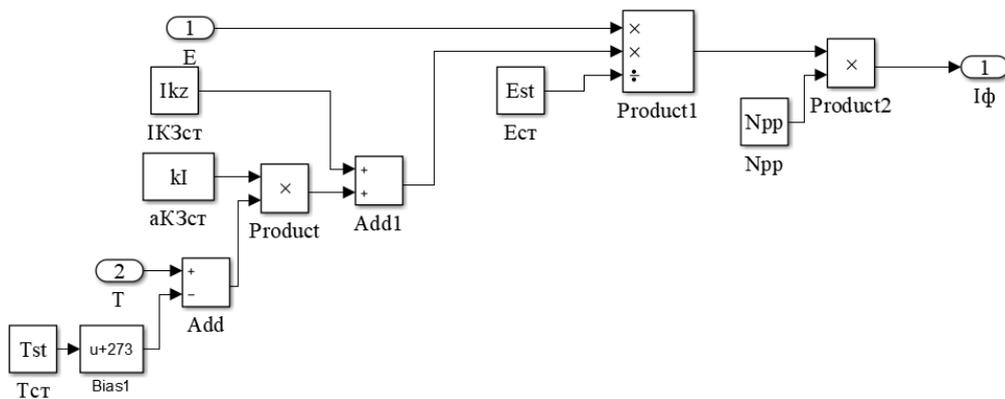


Рисунок 16 – Модель фототока в Matlab Simulink

По уравнению (5), с учётом конфигурации солнечных элементов в батарее, была собрана модель тока утечки солнечного элемента (рисунок 17).

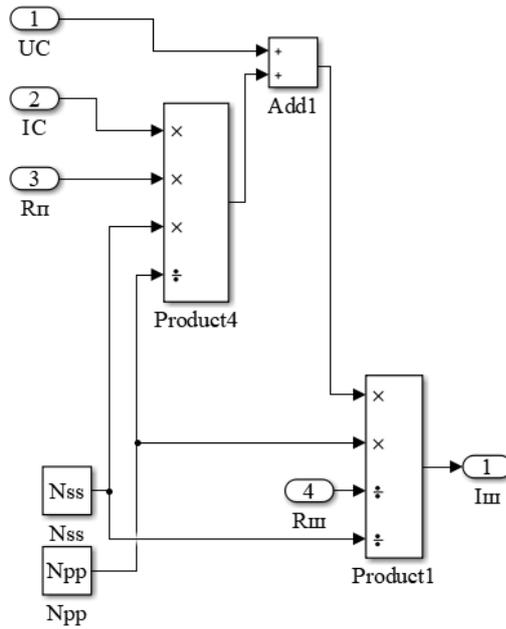


Рисунок 17 – Модель тока утечки в Matlab Simulink

Были собраны две модели уравнений обратных токов насыщения диода. Первая на основе уравнения (7) (рисунок 19). Вторая на основе уравнения (12) (рисунок 20). Также была собрана модель обратного тока насыщения диода по уравнению (8) (рисунок 18) необходимая для моделирования обратного тока диода по уравнению (12)

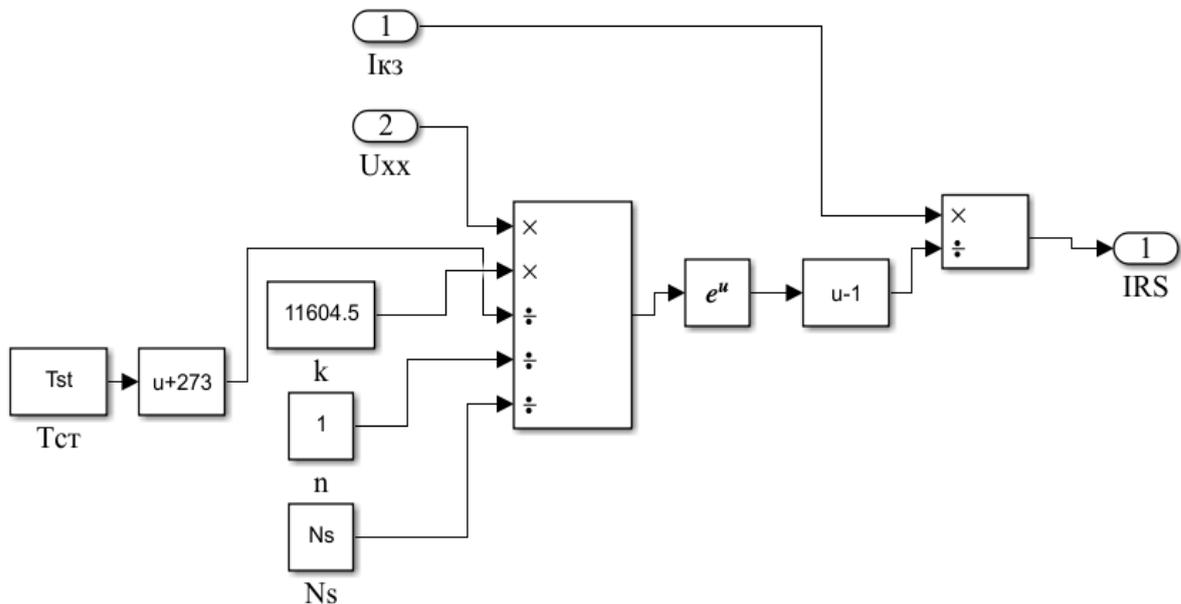


Рисунок 18 – Модель обратного тока насыщения при стандартных условиях в Matlab Simulink

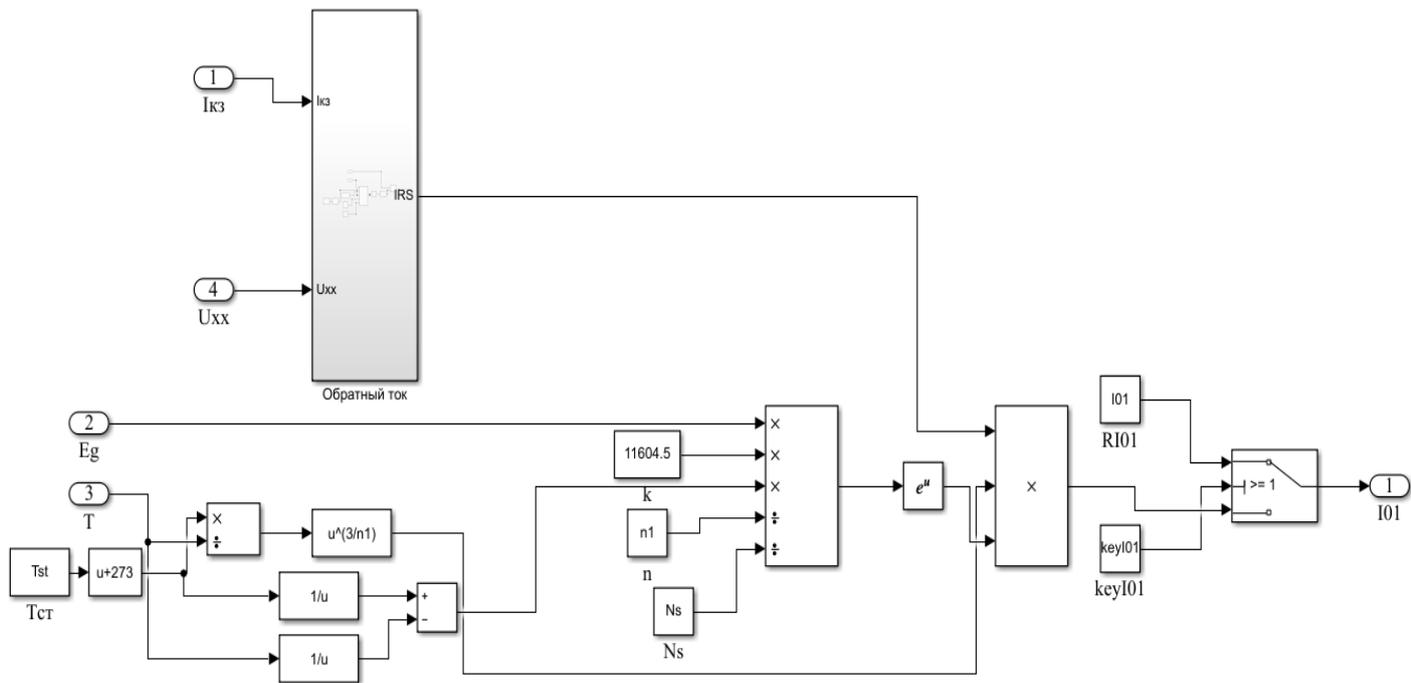


Рисунок 19 – Модель обратного тока насыщения диода в Matlab Simulink

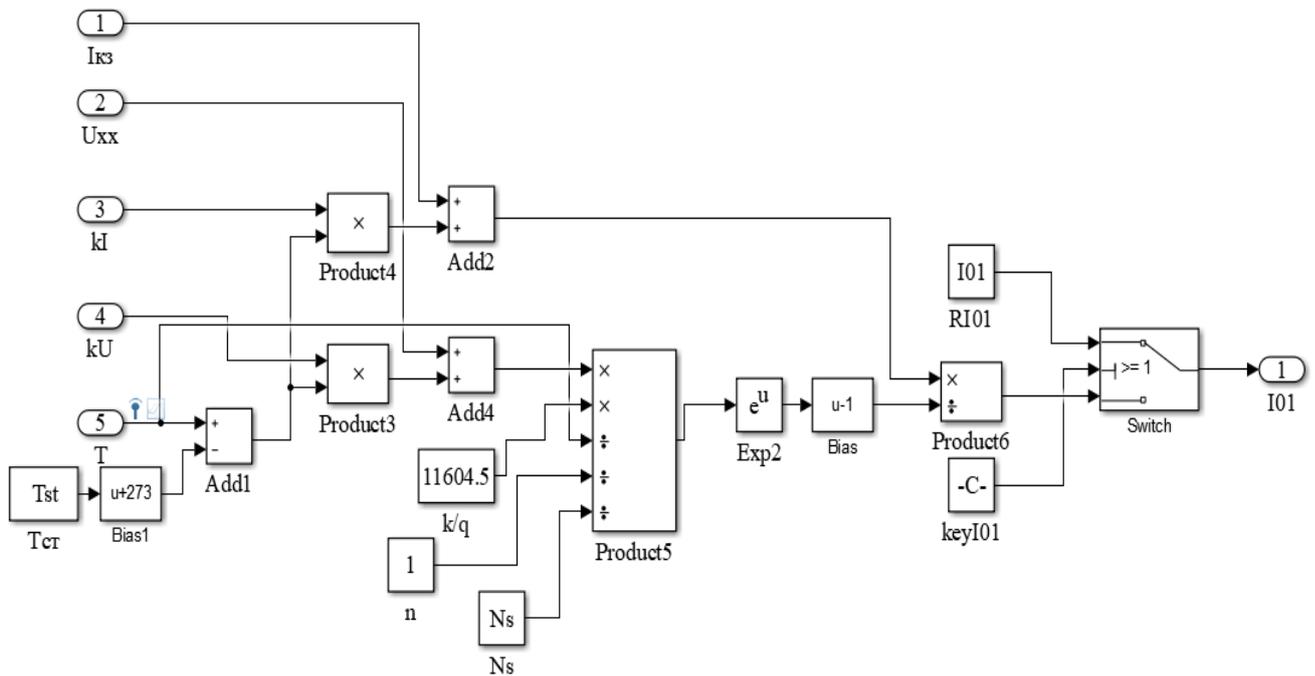


Рисунок 20 – Модель обратного тока насыщения диода в Matlab Simulink

По уравнению (6), с учётом конфигурации солнечных элементов в батарее, была собрана модель тока диода солнечного элемента (рисунок 21).

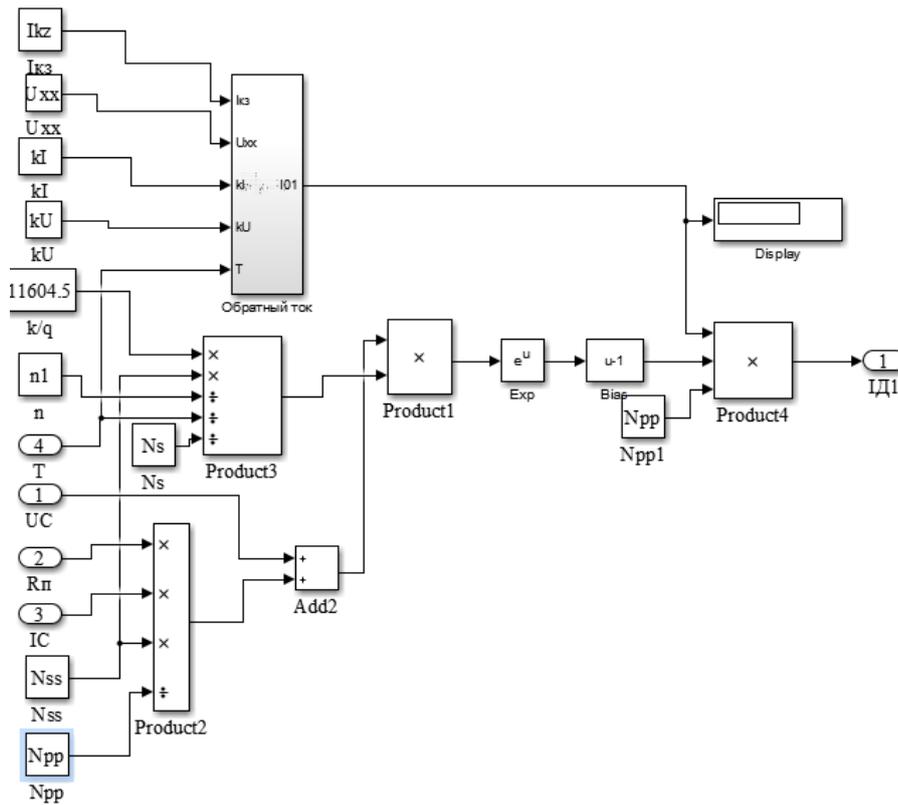


Рисунок 21 – Модель тока диода в Matlab Simulink

В результате все составляющие были объединены согласно уравнению (10) (рисунок 22) и уравнению (12) (рисунок 23).

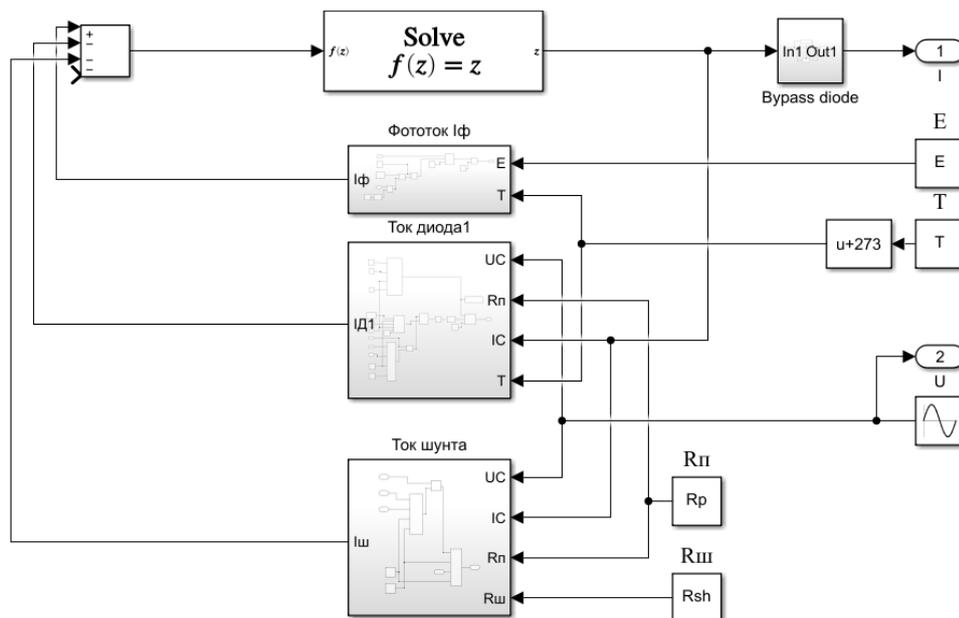


Рисунок 22 – Модель СЭ на основе одна-диодной схемы замещения в Matlab Simulink

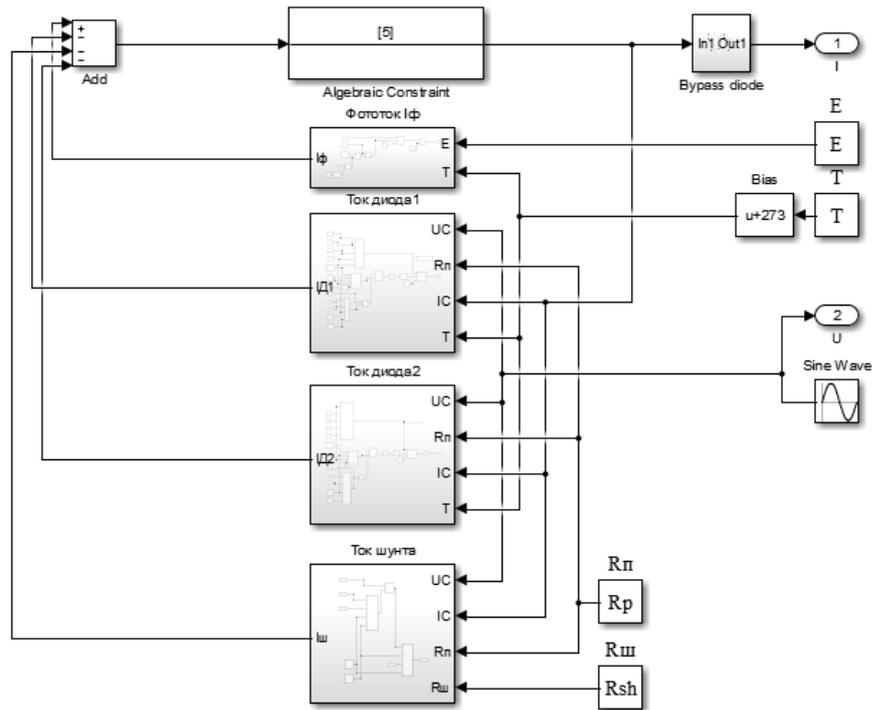


Рисунок 23 – Модель СЭ на основе двух-диодной схемы замещения в Matlab Simulink

2.3 Верификация модели

Верификация модели была произведена на основе двух солнечных батарей Kyocera KC200GT и Shell SQ 150-PC. В таблице 3 представлены параметры данных батарей согласно их техническим спецификациям [13,14]. Значения в таблице 3 представлены при стандартных условиях ($T=25^{\circ}\text{C}$, $E=1000 \text{ Вт/м}^2$).

Таблица 3 – Параметры солнечных панелей

Параметры	Kyocera KC200GT	Shell SQ 150-PC
P_{max} , Вт	200	150
U_{max} , В	26,3	34
I_{max} , А	7,61	4,4
U_{oc} , В	32,9	43,4
I_{sc} , А	8,21	4,8
N_s , шт	54	72
α_{SCT} , мА/ $^{\circ}\text{C}$	3,18	1,4
β_{SCT} , м/ $^{\circ}\text{C}$	-123	-161

Рассмотрим модель солнечного элемента на основе однодиодной схемы замещения с уравнением (7) для обратного тока насыщения диода. Было произведено сравнение с Kyocera KC200GT и Shell SQ 150-PC путём сравнения параметров при стандартных условиях (таблица 4,5) и сравнения ВАХ при различных уровнях освещённости (рисунок 24,25).

Таблица 4 – Сравнение параметров СБ Kyocera KC200GT и модели

Параметры	Kyocera KC200GT	Экспериментальная модель	Относительная погрешность, %
P_{max} , Вт	200	200,5	0,25
U_{max} , В	26,3	26,38	0,31
I_{max} , А	7,61	7,599	0,14
U_{oc} , В	32,9	32,86	0,12
I_{sc} , А	8,21	8,21	0

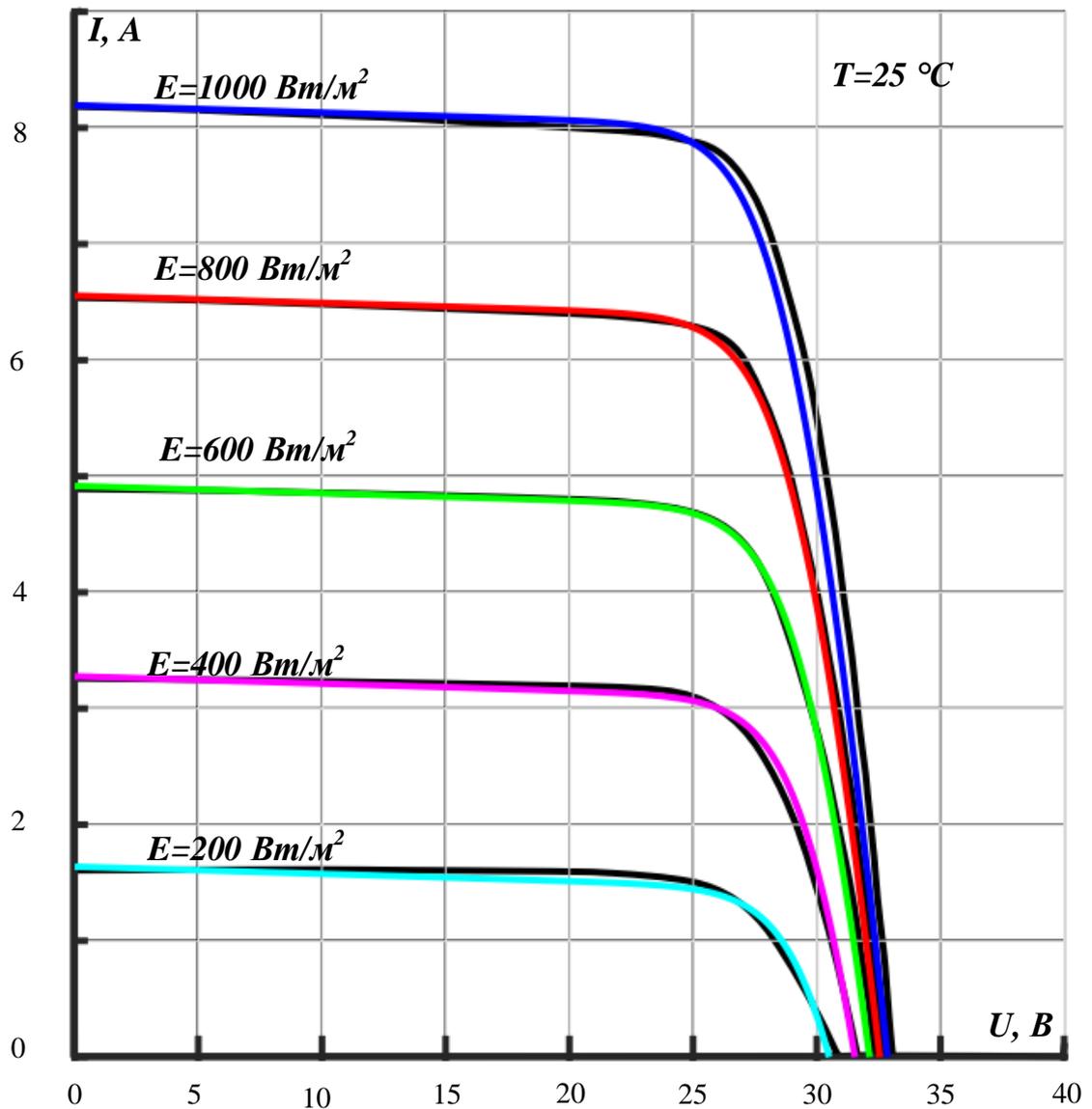


Рисунок 24 – ВАХ солнечной батареи Куосега KC200GT (чёрные кривые) и экспериментальной одна-диодной модели (цветные кривые)

Таблица 5 – Сравнение параметров СБ Shell SQ 150-PC и модели

Параметры	Shell SQ 150-PC	Экспериментальная модель	Относительная погрешность, %
P_{max} , Вт	150	149,9	0,67
U_{max} , В	34	34,08	0,235
I_{max} , А	4,4	4,398	0,45
U_{oc} , В	43,4	43,34	0,14
I_{sc} , А	4,8	4,8	0

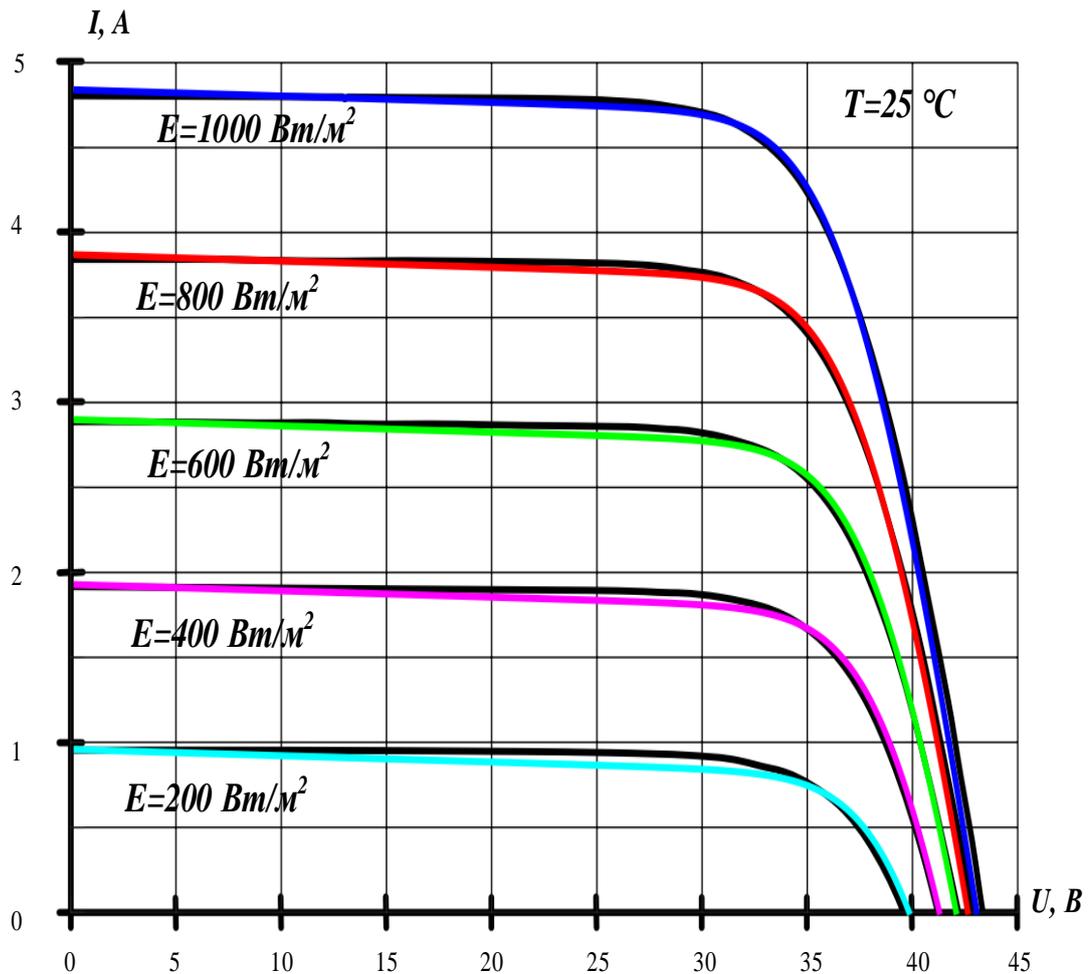


Рисунок 25 – ВАХ солнечной батареи Shell SQ 150-PC (чёрные кривые) и экспериментальной одна-диодной модели (цветные кривые)

Рассмотрим модель солнечного элемента на основе двухдиодной схемы замещения с уравнением (12) для обратного тока насыщения диода. Было произведено сравнение с Kyocera KC200GT и Shell SQ 150-PC путём сравнения параметров при стандартных условиях (таблица 6,7) и сравнения ВАХ при различных уровнях освещённости (рисунок 26,27).

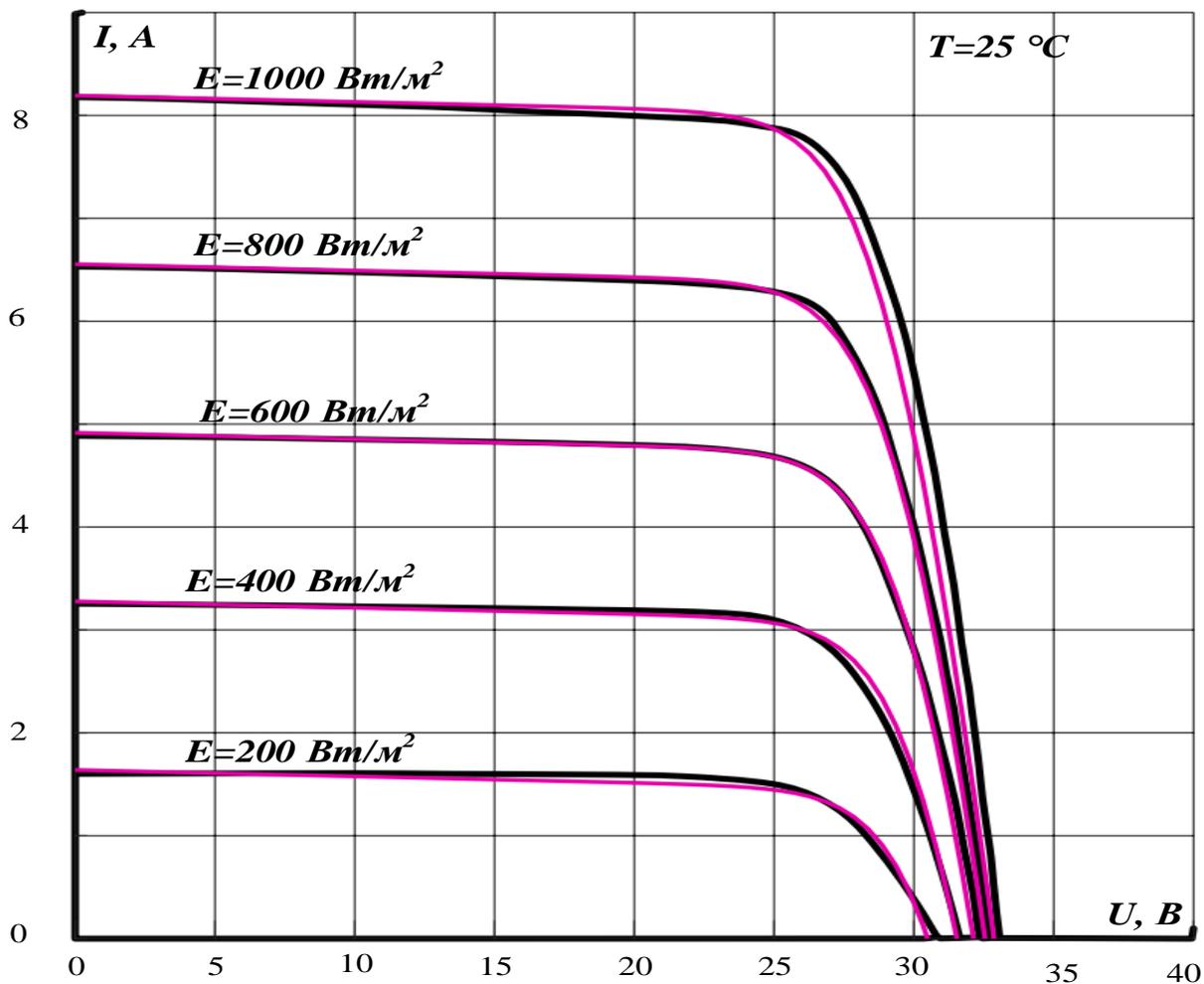


Рисунок 26 – ВАХ солнечной батареи Куосера KC200GT (чёрные кривые) и экспериментальной двух-диодной модели (фиолетовые кривые)

Таблица 6 – Сравнение параметров СБ Куосера KC200GT и модели

Параметры	Куосера KC200GT	Экспериментальная модель	Относительная погрешность, %
P_{max} , Вт	200	200,5	0,25
U_{max} , В	26,3	26,38	0,31
I_{max} , А	7,61	7,599	0,14
U_{oc} , В	32,9	32,86	0,12
I_{sc} , А	8,21	8,21	0

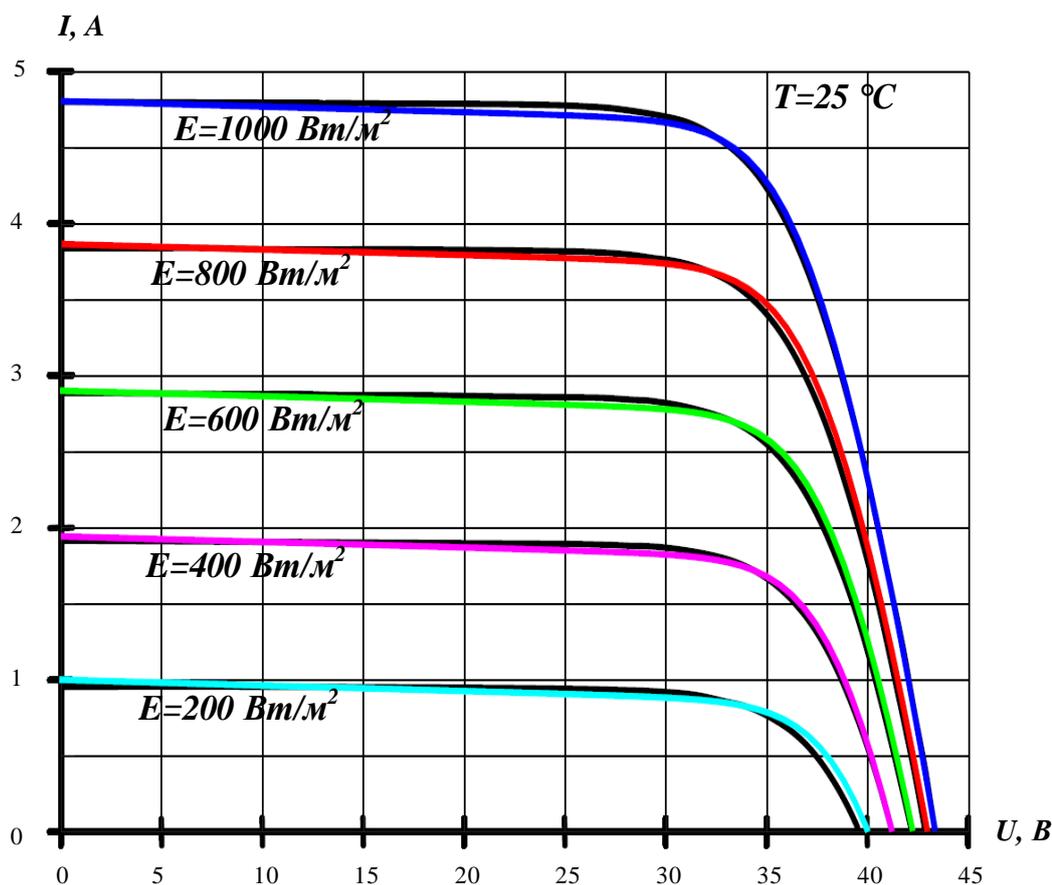


Рисунок 27 – ВАХ солнечной батареи Shell SQ 150-PC (чёрные кривые) и экспериментальной двух диодной модели (цветные кривые)

Таблица 7 – Сравнение параметров СБ Shell SQ 150-PC и модели

Параметры	Shell SQ 150-PC	Экспериментальная модель	Относительная погрешность, %
P_{max} , Вт	150	149,9	0,67
U_{max} , В	34	34,08	0,235
I_{max} , А	4,4	4,398	0,45
U_{oc} , В	43,4	43,34	0,14
I_{sc} , А	4,8	4,8	0

В результате проведения верификации можно утверждать, что модели солнечного элемента, основанные на однодиодной и двухдиодной схеме замещения, с достаточной точностью отражают параметры солнечных батарей Kyocera KC200GT и Shell SQ 150-PC при стандартных условиях и при изменении величины освещенности. Относительная погрешность измерений при стандартных параметрах не превышает 1%.

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Территория нашей страны обладает огромным потенциалом для использования солнечной энергии особенно регионы Дальнего Востока, Южной Сибири и Кавказа. В связи с этим, правительством Российской Федерации была разработана стратегия развития солнечной энергетики, которая предполагает рост объёма генерации электроэнергии на СЭС до 1,5-2% от общего объёма генерации электроэнергии.

В связи с поставленными планами внедрения всё большего количества солнечных электростанций, моделирование солнечных элементов становится актуальным вопросом. Моделирование солнечных элементов помогает решать такие основные задачи, как:

- Определение выходных параметров солнечного элемента (моделирование ВАХ):
- Определение оптимальной рабочей точки солнечного элемента в зависимости от изменения освещенности и температуры;
- Определение влияния затенения солнечного элемента;
- Определение схемных потерь.

В результате решения данного перечня задач, возможно принять необходимые меры для наиболее оптимального и эффективного использования солнечного элемента, т.е. получение наибольшего КПД.

Основной проблемой моделирования солнечного элемента является то, что не существует универсальной модели солнечного элемента, которая достаточно точно описывает процессы происходящие, при различных значениях освещенности, температуры и других изменяющихся параметров.

Целью раздела является оценка модели солнечного элемента с точки зрения финансового менеджмента и ресурсоэффективности. Для достижения цели необходимо выполнить следующие задачи: анализ конкурентоспособности модели солнечного элемента, планирование работ в рамках разрабатываемого проекта, а также расчет бюджета проекта.

5.1 Анализ конкурентных технических решений

Основным конкурентом на рынке моделирования солнечных элементов являются модели, которые предлагаются программой Matlab Simulink. В данной сфере они являются фактически монополистами.

Помимо, моделей из Matlab Simulink, как конкурентов стоит рассматривать модели, созданные в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Таблица 8 – Оценочная карта конкурентных технических разработок

Факторы конкурентоспособности	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Модели Matlab Simulink	Модели, созданные в МГТУ им. Н.Э. Баумана	Свой проект	Модели Matlab Simulink	Модели, созданные в МГТУ им. Н.Э. Баумана	Свой проект
Универсальность	0,3	3	4	5	0,9	1,2	1,5
Учёт влияния затенения	0,15	3	3	4	0,45	0,45	0,6
Учёт физических процессов в полупроводнике	0,15	3	4	4	0,45	0,6	0,6
Количество входных параметров	0,2	4	4	4	0,8	0,8	0,8
Отсутствие погрешности расчёта	0,2	3	5	4	0,6	1	0,8
Всего	1	13	20	21	3,2	4,05	4,3

Из оценочной карты видно, что модель, разрабатываемая в данном проекте наиболее конкурентоспособна. Основной упор в дальнейшей работе над моделью необходимо сосредоточить на снижение погрешности расчёта.

5.2 SWOT-анализ

SWOT-анализ представляет собой метод комплексной оценки внутренней и внешней среды проекта.

Таблица 9 – Матрица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны: С1. Универсальность модели; С2. Низкая погрешность в расчётах; С3. Учёт физических процессов в полупроводнике; С4. Универсальность программного обеспечения; С5. Простота интерфейса и удобство эксплуатации.</p>	<p>Слабые стороны: Сл1. Техническая сложность реализации модели Сл2. Необходимость квалифицированных специалистов для эксплуатации модели. Сл3. Необходимость высокой вычислительной мощности при эксплуатации модели.</p>
<p>Возможности: В1. Снижение стоимости модели В2. Появление дополнительного спроса на модели солнечных элементов В3. Повышение стоимости модели конкурентов (рост курса доллара). В4. Экспорт модели в страны СНГ</p>	<p>Исследуемая модель обладает высокими техническими показателями. В связи с этим, появляется возможность составить высокую конкуренцию существующим моделям. Это связано с тем, что помимо технического качество возможно предоставить более выгодную цену, так как конкуренты являются зарубежными компаниями.</p>	<p>Необходимость высокой вычислительной мощности при эксплуатации модели приводит к затратам на современное оборудование, однако, цена самой модели может быть снижена относительно цены конкурентов. Ввиду повышения спроса на модели в данную сферу будет привлекаться финансирование. Этот факт позволит привлечь квалифицированных специалистов.</p>
<p>Угрозы: У1. Развитие конкуренция в сфере моделирования солнечных элементов У2. Введение дополнительной государственной сертификации. У3. Недостаточное финансирование на внедрение новых технологий и оптимизацию существующих. У4. Прекращение поставок современного оборудования в связи с политической обстановкой</p>	<p>Даже в условия развития конкуренции модель будет оставаться конкурентоспособной из-за роста спроса на модели, так как технические преимущества, описанные сильными сторонами, позволяют решать задачи необходимые для проектирования и производства солнечных элементов. Также необходимо постоянного финансирования проекта.</p>	<p>Для эксплуатации модели требуется современная вычислительная техника, которая преимущественно поставляется из зарубежных стран (США, страны Евросоюза). В связи с нестабильной политической обстановкой (введением санкций) оборудование может перестать поставляться в полном объёме, что значительно затруднит эксплуатацию модели.</p>

Результат SWOT-анализа продемонстрировал сильные и слабые стороны модели солнечного элемента. Данная модель не имеет аналогов со

схожими техническими данными, что является сильной стороной данного проекта, но при этом требует мощную вычислительную технику и высококвалифицированных специалистов.

5.3 Планирование научно-исследовательских работ

5.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование разработки проекта – этап, необходимый для рациональной его организации. Выполним планирование в виде таблицы.

Таблица 10 – Перечень работ и распределение исполнителей

№ работы	Наименование работы	Исполнители работы
1	Выбор научного руководителя работы	Поярков Д.Е
2	Составление и утверждение темы работы	Бай Ю.Д., Поярков Д.Е
3	Составление календарного плана-графика выполнения работы	Бай Ю.Д.
4	Подбор и изучение литературы по теме работы	Поярков Д.Е
5	Анализ предметной области	Поярков Д.Е
6	Проектирование модели солнечного элемента	Поярков Д.Е, Бай Ю.Д.
7	Разработка модели солнечного элемента	Поярков Д.Е
8	Тестирование модели солнечного элемента	Поярков Д.Е, Бай Ю.Д.
9	Согласование выполненной работы с научным руководителем	Бай Ю.Д., Поярков Д.Е
10	Выполнение других частей работы (финансовый менеджмент, социальная ответственность)	Поярков Д.Е
11	Подведение итогов, оформление работы	Поярков Д.Е

5.3.2 Трудоемкость выполнения работ

Определение трудоёмкости выполнения работы не может быть осуществлена точным образом, так как время, затраченное на каждый этап

работы, зависит от многих факторов, учёт которых возможен только упрощенной форме. Из этого, следует, что определение значений максимальной (t_{\max_i}) и минимальной (t_{\min_i}) трудоёмкости работ выбирается из личного опыта студента.

Помимо максимального и минимального значения трудоёмкости определяется среднее или ожидаемое значение трудоёмкости по формуле:

$$t_{\text{ожі}} = \frac{3 \cdot t_{\min_i} + 2 \cdot t_{\max_i}}{5}.$$

5.3.3 График проведения научного исследования

Для разработки графика научного исследования необходимо рассчитать длительность работ. Для этого в первую очередь необходимо рассчитать коэффициент календарности по формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} = 1,22 ,$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году ($T_{\text{кал}}=365$);

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году (для 6-дневной рабочей недели $T_{\text{вых}}=52$);

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году (для 6-дневной рабочей недели $T_{\text{пр}}=14$).

Далее рассчитываем продолжительность выполнения работы в рабочих днях по формуле:

$$T_{\text{рi}} = \frac{t_{\text{ожі}}}{\text{Ч}_i} ,$$

где Ч_i – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Затем рассчитываем длительность работ в календарных днях по формуле:

$$T_{\text{ki}} = T_{\text{рi}} \cdot k_{\text{кал}} .$$

Полученные данные расчётов заносим в таблицу 11.

Таблица 11 – Трудоёмкость и длительность работ

Наименование работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ		Длительность работ	
	t_{min} , человеко- дни		t_{min} , человеко- дни		$t_{ож}$, человеко- дни		T_p , дни		T_k , дни	
	Бай Ю.Д.	Поярков Д.Е.	Бай Ю.Д.	Поярков Д.Е.	Бай Ю.Д.	Поярков Д.Е.	Бай Ю.Д.	Поярков Д.Е.	Бай Ю.Д.	Поярков Д.Е.
Выбор научного руководителя работы	-	2	-	4	-	3	-	3	-	3
Составление и утверждение темы работы	1	2	2	4	1	3	1	3	2	3
Составление календарного плана-графика выполнения работы	1	-	2	-	1	-	1	-	2	-
Подбор и изучение литературы по теме работы	-	10	-	20	-	14	-	14	-	17
Анализ предметной области	-	10	-	20	-	14	-	14	-	17
Проектирование модели солнечного элемента	1	9	2	18	1	13	1	13	2	15
Разработка модели солнечного элемента	-	10	-	20	-	14	-	14	-	17
Тестирование модели солнечного элемента	1	8	2	16	1	11	1	11	2	14
Согласование выполненной работы с научным руководителем	2	2	4	4	3	3	3	3	3	3
Выполнение других частей работы (финансовый менеджмент, социальная ответственность)	-	3	-	6	-	4	-	4	-	5
Подведение итогов, оформление работы	-	4	-	7	-	5	-	5	-	6
Итого	6	60	12	199	8	84	8	84	10	102

Пример расчёта для первой работы:

$$t_{ож1} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 4}{5} = 2,8 \approx 3 \text{ человеко-дня.}$$

$$T_{p1} = \frac{t_{ож1}}{C_1} = \frac{2,8}{1} = 2,8 \approx 3 \text{ дня;}$$

$$T_{k1} = T_{p1} \cdot k_{кал} = 2,8 \cdot 1,22 = 3,4 \approx 3 \text{ дня;}$$

На основе результатов таблицы 5 составим график Ганта с помощью онлайн программы GanttPRO (рисунок 42).

В ходе данного этапа работы были определены длительности и обозначены сроки выполнения всех запланированных видов работ. Был построен график Ганта, наглядно иллюстрирующий этапы выполнения проекта участниками. Итоговая длительность выполнения проекта в календарных днях составила 112 дня: 10 дней – длительность работ, выполняемых научным работником; 102 дня – длительность работ, выполняемых инженером.

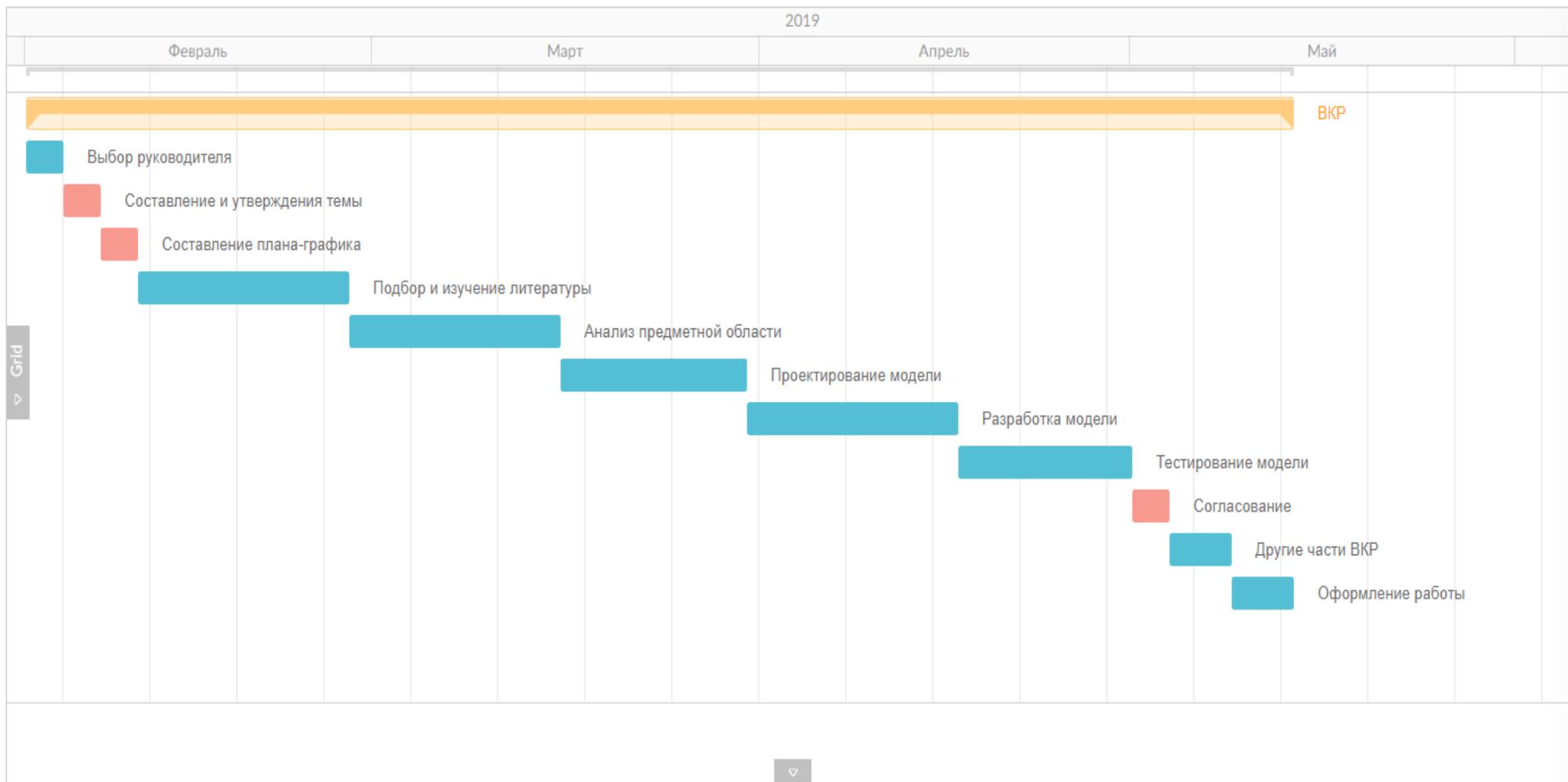


Рисунок 45 – График Ганта (голубым цветом – работа инженера, красным цветом – совместные работы студента и руководителя)

5.4 Бюджет научно-технического исследования

В процессе планирования бюджета проекта необходимо обеспечить полное и точное отражение всех видов расходов, которые связаны с его выполнением. Ниже представлена группировка затрат по статьям расходов, используемая при формировании бюджета проекта:

- материальные затраты проекта;
- амортизационные отчисления;
- основная заработная плата участников;
- дополнительная заработная плата участников;
- страховые отчисления;
- накладные расходы.

5.4.1 Материальные затраты

Расчет материальных затрат на разработку текущего проекта представлен в таблице 12.

Таблица 12 – Расчет материальных затрат на разработку проекта

Наименование	Цена, руб. (за шт.)	Кол-во	Общая стоимость, руб.
Ручка шариковая Stabilo Performer+ XF	87	2	174
Карандаш механический ICO Golf 0.5 мм	99	1	99
Грифели 0,5мм Н, КОН-I-NOOR	28	1	28
Ластик Elefant 300/30, КОН-I-NOOR	18	1	18
Тетрадь 48 листов клетка	24	2	48
Дырокол "Eagle" черный	130	1	130
Папка-скоросшиватель А4 с	8	4	32
Бумага SvetoCopy	256	1	256
Итого		785	

Исходя из данных, представленных в таблице 6, материальные затраты на выполнение проекта составили 785 рубль.

5.4.2. Затраты на амортизацию

Расчет затрат на оборудование и программные комплексы учитываем в виде амортизационных отчислений, так как данное оборудование и программы используется в течение длительного периода времени. Проектирование осуществлялось на ноутбуке HP 250. Были использованы следующие программные комплексы: Matlab Simulink и Microsoft Office 2010.

Таблица 13 – Затраты на оборудование и ПК и амортизацию

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, руб.	Амортизация, руб.
1	Лицензия на программный комплекс Matlab Simulink 2019	1	10000	456,62
2	Ноутбук+ Microsoft Office 2010	1	51500	4656,16
Итого ($Z_{\text{мат}}$)				5112,78

Продемонстрируем расчет показателей амортизации, результаты расчетов зафиксируем в таблице 13:

$$A_{\text{Matlab}} = \frac{\text{стоимость} \cdot N_{\text{дней.использования}}}{\text{срок службы} \cdot 365} = \frac{10000 \cdot 50}{3 \cdot 365} = 456,62 \text{ руб};$$

$$A_{\text{Ноутбук}} = \frac{\text{стоимость} \cdot N_{\text{дней.использования}}}{\text{срок.службы} \cdot 365} = \frac{51500 \cdot 99}{3 \cdot 365} = 4\ 656,16 \text{ руб.}$$

5.4.3 Основная заработная плата исполнителей

Для расчета основной заработной платы инженера берем оклад, равный 21760 руб.

Оклад руководителя составляет 21760 руб.

Пример расчёта основной заработной платы для руководителя:

Определим среднедневную заработную плату ($Z_{\text{дн}}$):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_0} = \frac{21760 \cdot 10,4}{243} = 931,29 \text{ руб},$$

где Z_m - оклад;

M - количество месяцев работы без отпуска в году;

F_∂ - действительный годовой фонд рабочего времени персонала (для 6-дневной недели $F_\partial = 243$ дня)

Рассчитаем основную заработную плату ($Z_{осн}$) по формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p \cdot (1 + K_{np} + K_\partial) \cdot K_p = 931,29 \cdot 10 \cdot (1 + 0,3 + 0,3) \cdot 1,3 = 19370,83 \text{ руб}$$

где T_p - продолжительность работ, выполняемых работником;

K_p – районный коэффициент (для Томска 1,3);

K_∂ – коэффициент доплат и надбавок (0,3);

K_{np} – премиальный коэффициент (0,3).

Таблица 14 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{дн}$, руб	K_{np}	K_∂	K_p	T_p , дни	$Z_{осн}$, руб
Научный руководитель	931,29	0,3	0,3	1,3	8	15 497
Инженер	931,29	0,2	0,2	1,3	84	152 545
Итого:						168 042

5.4.4 Дополнительная заработная плата исполнителей

Дополнительная заработная плата учитывает величину доплат за отклонение от нормальных условий труда и выплаты, связанные с обеспечением компенсаций и гарантий.

Рассчитаем дополнительную заработную плату по формуле:

$$Z_{доп.} = k_{доп} \cdot Z_{осн},$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (принимается равным 0,12).

Для руководителя:

$$Z_{доп.рук.} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,12 \cdot 15497 = 1 860 \text{ руб.};$$

Для инженера:

$$Z_{\text{доп.студ.}} = k_{\text{доп.}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0,12 \cdot 152545 = 18\,305 \text{ руб.};$$

Суммарно:

$$Z_{\text{доп.}} = Z_{\text{доп.рук.}} + Z_{\text{доп.студ.}} = 1860 + 18305 = 20\,165 \text{ руб.}$$

5.4.5 Отчисления во внебюджетные фонды

Данный вид отчислений отражает обязательные отчисления в фонд медицинского страхования, пенсионный фонд и фонд социального страхования.

Размер ставки данных отчислений составляет 30%. Определим размер отчислений по формуле:

$$Z_{\text{внеб.}} = k_{\text{внеб.}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп.}}),$$

где $k_{\text{внеб.}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Для руководителя:

$$Z_{\text{внеб.студ.}} = k_{\text{внеб.}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп.}}) = 0,3 \cdot (15497 + 1860) = 5\,207 \text{ руб.};$$

Для инженера:

$$Z_{\text{внеб.рук.}} = k_{\text{внеб.}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп.}}) = 0,3 \cdot (152545 + 18305) = 51\,255 \text{ руб.};$$

Суммарно:

$$Z_{\text{внеб.}} = Z_{\text{внеб.рук.}} + Z_{\text{внеб.студ.}} = 5207 + 51255 = 56\,462 \text{ руб.}$$

5.4.6 Накладные расходы

Данный вид расходов учитывает не попавшие в другие статьи расходов затраты (оплата коммунальных услуг, услуг печати и т.п.) Величину накладных расходов рассчитаем по формуле:

$$Z_{\text{накл.}} = (Z_{\text{аморт}} + Z_{\text{мат}} + Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп.}} + Z_{\text{внеб.}}) \cdot k_{\text{нр}},$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы (принимается равным 0,16)

$$Z_{\text{накл.}} = (5113 + 785 + 168042 + 20165 + 56462) \cdot 0,16 = 40\,091 \text{ руб.}$$

5.4.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Определение бюджета затрат выполним в табличном виде (таблица 15)

Таблица 15 – Бюджет затрат НИИ

Наименование	Сумма, руб.	Удельный вес, %
Материальные затраты	785	0,27
Амортизация	5113	1,76
Затраты на основную заработную плату	168 042	57,81
Затраты на дополнительную заработную плату	20 165	6,94
Страховые взносы	56 462	19,43
Накладные расходы	40 091	13,79
Общий бюджет	290 658	100

В соответствии с результатами расчета бюджета затрат на разработку проекта, сумма, необходимая на его реализацию составила 290 658 рублей. Основные расходы пришлось на статью затрат по основной заработной плате сотрудников – 57,81% от общего бюджета затрат проекта.

5.5 Описание потенциального эффекта

В результате выполнения раздела были выполнены все поставленные задачи.

Из анализа конкурентоспособности модели солнечного элемента, созданного входе данного проекта, следует, что данная модель представляется наиболее эффективным среди моделей конкурентов. Показатель конкурентоспособности выбранной модели превышает показатели рассмотренных конкурирующих моделей (стандартные модели в Matlab Simulink и модели, созданные в МГТУ им. Н.Э. Баумана) на 25,6 и 5,8 % соответственно.

Планирование работ в рамках разрабатываемого проекта было выполнено в полной мере. Итоговая длительность выполнения проекта составила 112 календарных дня.

Был выполнен расчет бюджета проекта. Сумма, необходимая на осуществление проекта, составила 290 658 рублей. Основные расходы приходятся на основную заработную плату сотрудников – 57,81% от общего бюджета затрат.

Положительный эффект данного исследования заключается в том, что создание универсальной модели солнечного элемента позволит наиболее точно и в кратчайшие сроки произвести необходимые расчёты для проектирования и производства солнечных элементов.

Создание такой модели поможет развитию предприятий, работающих в сфере проектирования и производства солнечных элементов.