

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический (ЭНИН)

Направление подготовки 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника

Кафедра Электроснабжение промышленных предприятий (ЭПП)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Использование солнечных трекеров для повышения эффективности применения солнечных фотоэлектрических установок

УДК 621.472.026.4

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM5Ч	Бальжинимаев Бадма Солбонович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Плотников Игорь Александрович	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. кафедрой МЕН	Чистякова Наталья Олеговна	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Бородин Юрий Викторович	к.т.н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Электроснабжение промышленных предприятий	Сурков М.А.	к.т.н., доцент		

Томск – 2017 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт Энергетический (ЭНИН)

Направление подготовки 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника

Кафедра Электроснабжение промышленных предприятий (ЭПП)

УТВЕРЖДАЮ:

И. о. зав. кафедрой ЭПП

(Подпись) _____ (Дата) **Сурков М.А.**
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5AM5Ч	Бальжинимаеву Бадме Солбоновичу

Тема работы:

Использование солнечных трекеров для повышения эффективности применения солнечных фотоэлектрических установок	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	13.02.2017 г. № 719/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

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>	Объектом исследования являются разработанные гибридные фотоэлектрические установки, имеющих в своем составе солнечный трекер, для электроснабжения метеорологической станции в юго-восточной части России, не имеющей доступа к централизованной сети. Электроснабжение данной метеостанции с постоянным графиком нагрузки (< 10 кВт) производится как на базе бензиновой генераторной установки так и с использованием возобновляемых источников энергии, в частности фотоэлектрические системы.
--	---

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>	- Анализ проблемы электроснабжения децентрализованных потребителей в мире и России - Определение оптимальных решений электроснабжения объекта с учетом потенциала возобновляемых источников энергии - Анализ схем фотоэлектрических автономных комплексов электроснабжения и методов повышения их эффективности - Анализ потребления электроэнергии объекта - Расчет солнечной радиации, поступающей на поверхность с использованием солнечных трекеров (при разном положении солнечных панелей) - Проектирование окончательной системы электроснабжения объекта - Выбор и моделирование элементов фотоэлектрических систем - Технико-экономическое сравнение вариантов электроснабжения объекта
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Однолинейная схема системы электроснабжения объекта

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент	Чистякова Наталья Олеговна
Социальная ответственность	Бородин Юрий Викторович
Раздел, выполненный на иностранном языке	Тарасова Екатерина Сергеевна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	
Введение	
Заключение	

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

Задание выдал руководитель:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM5Ч	Бальжинимаев Бадма Солбонович		

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

Студенту:

Группа	ФИО
5AM5Ч	Бальжинимаеву Бадме Солбоновичу

Институт	Энергетический	Кафедра	Электроснабжение промышленных предприятий (ЭПП)
Уровень образования	магистр	Направление/специальность	13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов определяется по статистическому анализу текущих цен на российском рынке за 2017 год
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Нормы и нормативы расходования ресурсов заданы в соответствии с технической документацией используемого оборудования
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	- Система налогообложения применяется в соответствии с НК РФ от 28.12.2016 N 146-ФЗ - Ставка дисконтирования 9%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка и анализ данных, по основным экономическим показателям, внедряемых проектов</i>	- Оценка и анализ решений по основным экономическим показателям: : расчет чистой дисконтированной стоимости и минимальной цены за электроэнергию - Определение капитальных затрат, эксплуатационных издержек, ставки дисконтирования, прогноз инфляции и роста цен на топливо, построение финансовой модели для каждого проекта
2. <i>Расчет и анализ экономических показателей, используемых для оценки эффективности инвестиционных затрат проекта</i>	- Расчет финансовых потоков в течение срока жизни инвестиционных проектов, чистой приведенной стоимости, минимальной цены производимой электроэнергии

	- Проект рассматривается с точки зрения государственной некоммерческой организации “Росгидромет”
3. Анализ чувствительности инвестиционных проектов, определение экономической эффективности	- Моделирование динамики изменения чистой приведенной стоимости проектов при изменении одного из параметров исходных данных, построение соответствующих характеристик, определение экономической эффективности и целесообразности проектов

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Диаграммы капитальных затрат каждого варианта технического решения
2. Диаграммы денежного потока каждого варианта технического решения
3. График зависимости ЧПС от стоимости топлива
4. График зависимости ЧПС от ставки дисконтирования
5. График зависимости ЧПС от капитальных затрат
6. График зависимости ЧПС от цены солнечного трекера
7. График зависимости ЧПС от количества установленных солнечных панелей

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. кафедрой МЕН	Чистякова Наталья Олеговна	Кандидат экономических наук, доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM5Ч	Бальжинимаев Бадма Солбонович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5AM5Ч	Бальжинимаеву Бадме Солбоновичу

Институт	Энергетический	Кафедра	Электроснабжение промышленных предприятий (ЭПП)
Уровень образования	магистр	Направление/специальность	13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:

- вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения)
- опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы)
- негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)
- чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)

2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:

- физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;
- действие фактора на организм человека;
- приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);
- предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)

2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности

- механические опасности (источники, средства защиты);
- термические опасности (источники, средства защиты);

– <i>электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);</i> – <i>пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)</i>	
3. Охрана окружающей среды: – <i>защита селитебной зоны</i> – <i>анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</i> – <i>анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</i> – <i>анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</i> – <i>разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</i>	
4. Защита в чрезвычайных ситуациях: – <i>перечень возможных ЧС на объекте;</i> – <i>выбор наиболее типичной ЧС;</i> – <i>разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</i> – <i>разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС;</i> – <i>разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий</i>	
5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – <i>специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</i> – <i>организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны</i>	
Перечень графического материала:	
<i>При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)</i>	

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Бородин Юрий Викторович	Кандидат технических наук, доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ5Ч	Бальжинимаев Бадма Солбонович		

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт **Энергетический (ЭНИН)**

Направление подготовки **13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника**

Уровень образования **магистр**

Кафедра **Электроснабжение промышленных предприятий (ЭПП)**

Период выполнения **осенний 2015/2016/, весенний семестр 2016/2017 учебного года**

Форма представления работы:

магистерская диссертация

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.09.2016	Анализ проблемы электроснабжения децентрализованных потребителей в мире и России. Определение оптимальных решений электроснабжения объекта с учетом потенциала возобновляемых источников энергии	
10.10.2016	Анализ схем фотоэлектрических автономных комплексов электроснабжения и методов повышения их эффективности. Анализ технических характеристик солнечных трекеров, классификация и методы управления.	
05.11.2016	Выбор объекта потребления электроэнергии. Определение оптимальных решений электроснабжения объекта. Разработка структурных схем, выбор оборудования и проектирование окончательной системы электроснабжения объекта	
15.12.2016	Технико-экономическое сравнение вариантов электроснабжения объекта	

Составил преподаватель:

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

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Электроснабжение промышленных предприятий	Сурков М.А.	к.т.н., доцент		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 163 с., 41 рис., 25 табл., 78 источников, 15 прил.

В работе рассмотрена технико-экономическая оценка возможных вариантов автономного электроснабжения объекта исследования. Определены электрические нагрузки объекта и потенциал использования возобновляемых источников. Также, предоставляется расчет солнечной радиации при разных случаях положения солнечных панелей: фиксированное положение панелей в течение всего периода эксплуатации, сезонное изменение положения панелей, одноосевое слежение за солнцем и двухосевое слежение. Особое внимание уделяется объяснению основных параметров экономической модели, таких как капитальные затраты, эксплуатационные издержки техобслуживания на установленное оборудование. Рассмотренные системы электроснабжения сравниваются между собой с использованием следующих экономических критериев: чистая приведенная стоимость, минимальная цена на электроэнергию. Также произведен анализ чувствительности на основе параметров, которые оказывают наиболее существенное влияние на изменение ЧПС: стоимость инвестиций, ставка дисконтирования, стоимость топлива, цена на солнечный трекер, количество солнечных панелей.

Цель работы: анализ использования солнечных трекеров как способ повышения эффективности фотоэлектрических установок.

Область применения: в малой энергетике для децентрализованных районов России

Ключевые слова: электроснабжение, солнечная фотоэлектрическая установка, солнечная панель, солнечный трекер, система слежения, генераторная установка, экономическое обоснование проекта, анализ чувствительности.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	14
1. ПРОБЛЕМА ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ РАЙОНАХ	18
1.1. В МИРЕ	18
1.2. В РОССИИ	21
1.3. АВТОНОМНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.....	24
1.4. ПОТЕНЦИАЛ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ В РОССИИ	27
1.4.1. Ветровая энергия	30
1.4.2. Энергия биомассы	30
1.4.3. Геотермальная энергия	31
1.4.4. Малая гидроэнергетика.....	32
1.4.5. Солнечная энергия	33
2. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. ВВЕДЕНИЕ	37
2.1. АВТНОМНЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.....	38
2.2. ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ И ПАРАМЕТРЫ PV-СИСТЕМ	39
2.2.1. Солнечная панель	39
2.2.2. Инвертор	40
2.2.3. Аккумуляторная батарея.....	41
2.2.4. Контроллер	41
2.3. ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ АВТОНОМНЫХ PV-СИСТЕМ.....	42
2.4. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ PV-СИСТЕМ.....	43
2.4.1. Разработка технологии производства солнечных элементов	44
2.4.2. Оптимизация структуры солнечных элементов	46
2.4.3. Использование концентраторов солнечной радиации	47
2.4.4. Реализация режима отбора максимальной мощности.....	48
2.4.5. Использование солнечных трекеров.....	49
3. СОЛНЕЧНЫЙ ТРЕКЕР	50
3.1. ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ СОЛНЕЧНОГО ТРЕКЕРА.....	50

3.2.	ТИПЫ СОЛНЕЧНЫХ ТРЕКЕРОВ	52
3.2.1.	Система с фиксированным углом панелей	52
3.2.2.	Одноосевая система слежения	53
3.2.3.	Двухосевая система слежения	55
3.3.	МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНЫМИ ТРЕКЕРАМИ	56
3.3.1.	Пассивный метод	57
3.3.2.	Активный метод	57
3.3.3.	Ручное управление	58
3.4.	ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ТРЕКЕРОВ	58
3.5.	КЛАССИФИКАЦИЯ СОЛНЕЧНЫХ ТРЕКЕРОВ ДЛЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	59
3.5.1.	Система слежения, основанная на термическом регулировании	59
3.5.2.	Система слежения, основанная на электрическом регулировании	62
4.	ВЫБОР ОБЪЕКТА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	65
4.1.	ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ОБЪЕКТА	68
4.2.	ВАРИАНТЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТА	71
4.3.	СИСТЕМА ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ	72
4.4.	СИСТЕМА ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ PV-СИСТЕМЫ	76
4.4.1.	Солнечная радиация и метод расчета	77
4.4.2.	Система PV с оптимальным наклоном панелей	84
4.4.3.	Двухосевая система слежения	87
4.4.4.	Одноосевая система слежения	89
4.4.5.	Фиксированное положение панелей	90
4.5.	РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА СОЛНЕЧНОГО РАДИАЦИИ	91
4.6.	СОЛНЕЧНАЯ ИНСОЛЯЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОНЛАЙН- КАЛЬКУЛЯТОРОВ	94
4.7.	СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРИНЦИП РАБОТЫ	95
4.7.1.	Выбор типа и количества панелей	98
4.7.2.	Вырабатываемая энергия панелями	99
4.7.3.	Выбор типа аккумуляторной батареи и количества	101

4.7.4.	Выбор контроллера	104
4.7.5.	Выбор инвертора	105
4.7.6.	Выбор солнечного трекера	105
4.8.	ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС PV-СИСТЕМ	106
5.	ECONOMIC EVALUATION	110
5.1.	METHODOLOGY	110
5.1.1.	Discount rate	111
5.1.2.	Inflation rate	111
5.1.3.	Fuel price growth rate	112
5.2.	INPUT DATA	112
5.2.1.	Investment costs	112
5.2.2.	Operating costs	115
5.2.4.	Reinvestment of equipment	117
5.3.	ECONOMIC RESULTS	119
	Comparison of the variants	120
5.4.	SENSITIVITY ANALYSIS	123
5.4.1.	Sensitivity on fuel price	123
5.4.2.	Sensitivity on discount rate	124
5.4.3.	Sensitivity on initial investment costs of the system	125
5.4.4.	Sensitivity on cost of solar tracker	127
5.4.5.	Sensitivity on number of panels	128
6.	СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	131
6.1.	Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды 131	
6.1.1.	Электростатическое излучение	131
6.1.2.	Электрическое поле промышленной частоты	132
6.1.3.	Шум	133
6.1.4.	Освещение	134
6.1.5.	Пожарная безопасность	135
6.1.6.	Экологическая безопасность	138
6.2.	Чрезвычайные ситуации	138

6.3. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	138
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	140
CONCLUSION	144
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	148
ПРИЛОЖЕНИЯ	154

ВВЕДЕНИЕ

За последние десятилетия потребление электрической энергии растет стремительными темпами. Такой рост объясняется главным образом увеличением численности населения и экономическим развитием стран. Около 81% мирового потребления энергии получается путем сжигания ископаемого топлива [1]. В свою очередь, электроэнергия, получаемая из ископаемого топлива, сильно влияет на окружающую среду и человечество, например, на потребление кислорода и воды, выбросы газа и токсичных веществ, истощение запасов ископаемых видов топлива и глобальное потепление. В результате, все эти факторы приводят к неустойчивой ситуации в будущем. В современных условиях существует два варианта снижения вышеупомянутых вредных воздействий. Первый вариант – активное использование энергосберегающих технологий. Второй вариант – интенсивное внедрение возобновляемых источников энергии, включая энергию биомасс и ветра, гидроэнергетику, геотермальную и солнечную энергию. В настоящее время ВИЭ вносят значительный вклад в мировое энергоснабжение. Существует колоссальное множество успешных примеров внедрения ВИЭ. Таким образом, эти источники уже имеют большой потенциал для замены ископаемых видов топлива и, в целом, могут удовлетворить будущую потребность в электроэнергии.

По сравнению со всеми имеющимися нетрадиционными источниками энергии солнечная энергия является одним из наиболее перспективных направлений развития возобновляемых источников. Использование солнечной энергии характеризуется следующими преимуществами: неисчерпаемым ресурсом, экологически чистым и распространенным источником. Сегодня среди разнообразных технологий солнечной энергии, фотоэлектрические системы занимают лидирующую позицию и является наиболее многообещающим направлением производства электрической энергии. Где экономически эффективным способом использования фотоэлектрических систем является

энергоснабжение децентрализованных объектов в отдаленных районах. Замена дизель-генераторов для фотоэлектрических систем в этом случае позволяет решать не только энергетические проблемы, а также проблемы экологии, а в ряде случаев это экономически целесообразно.

Несмотря на все достоинства, фотоэлектрические системы имеют ряд недостатков. Наряду с высокими инвестиционными затратами и низкой эффективностью фотоэлементов существует одна из основных проблем использования PV-систем: снижение их эффективности, когда солнечные панели дезориентированы на Солнце. В настоящее время большинство панелей наклонены под фиксированным углом в течение всего периода эксплуатации и поэтому PV-системы не используют весь потенциал приходящего на поверхность солнечного излучения, что приводит к более низкой выходной мощности всей системы. Выходная мощность PV-системы достигает своего максимального значения, когда солнечные панели направлены перпендикулярно к лучам Солнца. Решением этой проблемы является использование системы слежения за солнцем или солнечного трекера. Солнечный трекер - это устройство, предназначенное для ориентации PV панели вслед за положением Солнца. Эти устройства меняют свое положение в течение дня, следуя за положением Солнца, чтобы максимизировать приходящую энергию. Таким образом, солнечный трекер значительно увеличивает выходную мощность фотоэлектрической системы на 30 – 55% по сравнению со стационарными PV панелями [2]. Но основным фактором ограничения использования солнечных трекеров является их значительная стоимость из-за более сложных технологий, системы управления и движущихся частей. Таким образом, являются ли солнечные трекеры полезными и рекомендуемыми, зависит от различных факторов. И, следовательно, возникает разумный вопрос об эффективности использования слежения за Солнцем.

Поэтому цель данной работы – это необходимость определить является ли использование солнечных трекеров разумным способом повышения эффективности фотоэлектрических установок, как с технической точки зрения, так и с экономической.

INTRODUCTION

Energy consumption has been rapidly increasing in the world over the last decades. The growth is mainly explained by population increase and the economic development of countries. Almost 81% of the world energy consumption is obtained by combustion of fossil fuels. The energy based on fossil fuels affects the environment and humanity, for instance, oxygen and water consumption, gas and toxic emissions, depletion of fossil fuels reserves, and global warming. Therefore, all these factors are leading to an unsustainable situation in the future. In modern conditions, there are two options to decrease the above-mentioned harmful impacts. The first option is the active usage of energy-saving technologies. The second option is an intensive introduction of renewable energy sources including biomass, wind, hydro, geothermal and solar energy. At the moment, RES make a significant contribution to the energy supply. Thus, these sources have already a great potential to replace fossil fuels and can meet the future required demand of energy.

In comparison with all available non-conventional energy sources, solar energy looks as one of the most promising directions of renewable energy development. Solar energy utilization is characterized by the following advantage factors: inexhaustible resource, environmentally friendly and widespread distribution. Today, among the diverse types of solar energy technologies, the photovoltaic system is one of the perspective directions to produce electrical energy. The most relevant and cost-effective way of utilization of PV systems is as a power supply of decentralized objects in remote areas. The substitution of diesel generators for PV systems, in this case, allows to solve energy as well as ecology problems, and in a number of cases it is economically feasible.

However, photovoltaic systems have a number of drawbacks. Along with the high investment cost and low efficiency of photocells, there is one of the major problem in PV system utilization: a decrease in their efficiency when the solar panels are disoriented to the Sun. Presently, the majority of PV panels are inclined at a fixed optimal angle during the whole operational period. Therefore, PV systems do not use the whole potential of the incoming solar radiation. This results in a lower power output of the overall PV system.

The power output of the PV system reaches its maximum value when the solar panels are perpendicular to the Sun's rays. Therefore, the solution to this problem is the usage of a sun tracking system or a solar tracker. A solar tracker is a device that is designed to orient the PV panel toward to the Sun's position. These devices change their orientation throughout the day to follow the Sun's path in order to maximize energy capture. Thus, a solar tracker can significantly increase the power output by up to 30 – 55% compared to stationary PV panels. But the major constraint factor of solar tracker utilization is the significant cost of trackers due to more complex technology and moving parts. Thereby, whether solar trackers are beneficial and recommended is dependent on various factors. The reasonable question about the viability of Sun tracking is arising.

Therefore, the objective of the thesis is to identify whether the usage of solar trackers in PV systems is reasonable from both technical and economic points of view.

1. ПРОБЛЕМА ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ РАЙОНАХ

1.1. В МИРЕ

Постоянный рост населения мира является причиной того, что проблема электрификации всегда будет существовать. Сегодня население мира составляет около 7,4 млрд. человек и продолжает расти. Согласно «Данным о населении мира», в 2030 году население достигнет 8,5 млрд. человек. Рост населения приводит к росту мировой экономики. Соответственно, рост мировой экономики приводит к увеличению спроса на энергию [3].

На данный момент существует ряд стран, которые сталкиваются с проблемой, связанной с доступом к энергетическим услугам. По данным МЭА, около 1,2 млрд. человек (это около 17% мирового населения) живут без электричества, и около 1 млрд. человек имеют лишь ненадежное и неустойчивое энергоснабжение. Более 95% людей, живущих без доступа к электричеству, находятся в странах Африки к югу от Сахары и в Азии, где большинство проживает в сельских районах (около 80% от всего мира). На Индию, которая насчитывает одну шестую часть мирового населения, приходится лишь 6% мирового потребления энергии, и каждый пятый из населения по-прежнему не имеет доступа к электричеству [4].

В развивающихся странах доступ к приемлемым, безопасным и надежным энергетическим услугам является основополагающим. Это приводит к уменьшению уровня бедности, соответственно, к повышению уровня здравоохранения, производительности и конкурентоспособности, а также способствует росту экономического сектора страны. Кроме того, доступ к энергии связан с такими важными факторами, как чистая вода и здравоохранение, обеспечение надежного отопления, освещения, транспорта и

телекоммуникационных услуг. В Таблица 1 показана ситуация с мировой электрификацией.

Таблица 1 – Доступ к электричеству в 2016 году [5]

Region	Население без электрическ ой энергии , мил.	Электрификация, %	Городская электрифик ация, %	Сельская электрификац ия , %
Развивающиеся страны	1 200	78%	92%	67%
Африка	635	43%	68%	26%
<i>Северная Африка</i>	<i>1</i>	<i>99%</i>	<i>100%</i>	<i>99%</i>
<i>Субсахарская Африка</i>	<i>634</i>	<i>32%</i>	<i>59%</i>	<i>17%</i>
Развивающаяся Азия	526	86%	96%	78%
<i>Индия</i>	<i>237</i>	<i>81%</i>	<i>96%</i>	<i>74%</i>
Латинская Америка	22	95%	98%	85%
Средний Восток	17	92%	98%	79%
Мир	1 201	83%	95%	70%

Как уже упоминалось ранее, большинство населения живет в сельской удаленно местности. Проблема электрификации может быть вызвана следующими технико-

экономическими причинами: ненадлежащими и грубыми географическими условиями, экономически невыгодно строить линии электропередач, отсутствием финансирования и инвестиций. В случае, когда нет возможности подключиться к центральной электрической сети по техническим или экономическим причинам, альтернативные варианты, которые соответствуют требованиям, должны быть рассмотрены. Другими словами, альтернативные варианты это системы децентрализованного энергоснабжения (ДЭС).

Системы ДЭС – это системы, которые генерируют энергию из источника питания без подключения к централизованной сети, так называемые «внесетевые» или «автономные» системы. Эти системы являются гибкими, модульными и расположены близко к объекту снабжения. Существует несколько способов децентрализованного энергоснабжения. Его можно классифицировать на традиционные, нетрадиционные и гибридные энергетические системы. Традиционные системы основаны на ископаемом топливе (как правило, дизельное топливо, нефть), нетрадиционные системы – на возобновляемых источниках энергии, и гибридные как на ископаемом топливе, так и на возобновляемых источниках.

В настоящее время системы ДЭС играют жизненно важную роль в предоставлении энергетических услуг. В таких странах, как Дания, Германия, США, Китай, автономные энергетические системы, основанные на ВИЭ, уже в состоянии заменить или дополнить традиционные энергосистемы в районах без подключения к централизованному источнику питания. Исходя из опыта таких стран, уже доказано, что автономные системы являются доступным, надежным и экономичным способом энергоснабжения децентрализованных потребителей [6].

1.2. В РОССИИ

По оценкам экспертов, около 70% территории России принадлежит децентрализованной зоне, в которой проживает около 20 миллионов человек, или примерно 14% от всего населения России [7]. Большинство этих децентрализованных территорий располагаются в районах с суровыми климатическими условиями. Таким образом, надежное энергоснабжение населения в этих районах является важнейшей экономической проблемой для многих субъектов Российской Федерации. Децентрализованные районы России представлены на Рисунок 1.

Российская Федерация является типичным примером страны с уже развитой системой централизованной энергосети. В то же время Россия нуждается в децентрализованной системе энергоснабжения. Большая часть территории России характеризуется низкой плотностью населения и большими расстояниями между централизованными энергосистемами и потребителями. Плотность населения на территории России представлена на Рисунок 2.

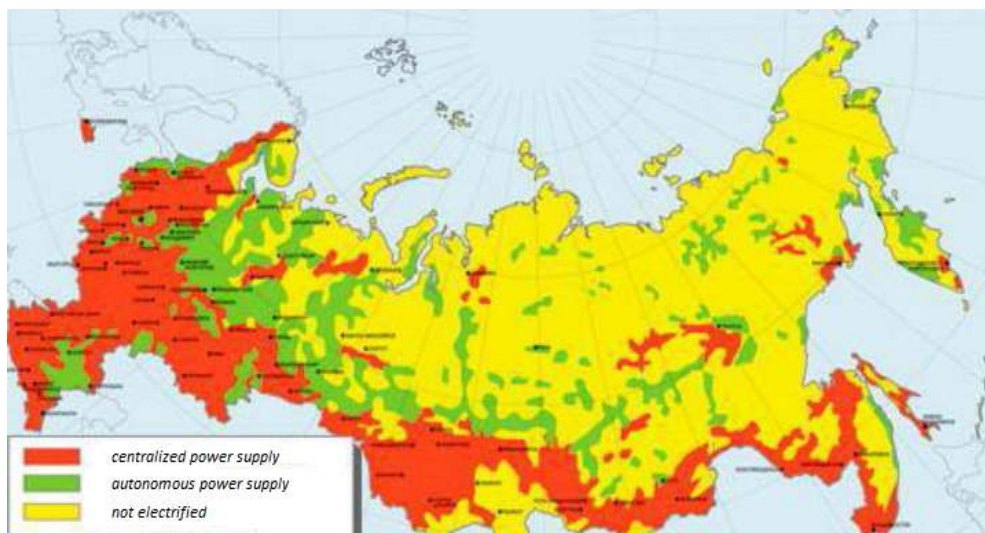


Рисунок 1 – Децентрализованные районы России [8]

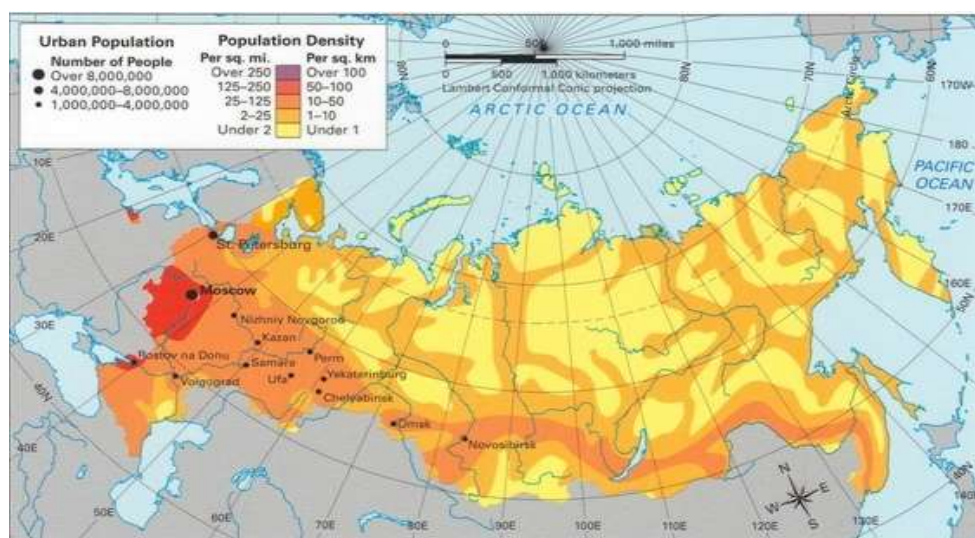


Рисунок 2 – Плотность населения на территории России [9]

На рисунке 1 показано, что более половины территории России вообще не электрифицировано. Из рисунка 2 видно, что низкая плотность населения с низкой степенью электрификации преобладает на Дальнем Востоке, в Северной и Восточной Сибири [10]. Согласно картам, можно сделать вывод, что российский потенциал для децентрализованного энергоснабжения чрезвычайно высок. В Таблица 2 представлен статистический обзор населения в районах без централизованного электроснабжения.

Таблица 2 – Информация о населении в районах децентрализованного электроснабжения [11]

Количество людей, проживающих в населенных пунктах	Количество населенных пунктов	Население в пункте
До 50	13 500	172 600
От 51 до 500	11 100	2 400 000
От 501 до 3 000	5 700	5 900 000
От 3001 до 10 000	580	2 600 000
Итого		11 072 600

Не электрифицированные регионы сталкиваются с такими проблемами, как высокая уровень нищеты, безработица, низкие жизненные условия, недостаточное развитие сельского хозяйства и переселение. Электроснабжение таких потребителей в целом может осуществляться либо посредством централизованного электроснабжения, либо путем создания децентрализованных источников энергии. Тем не менее, очевидно, что строительство линий электропередач в централизованной системе является очевидным вариантом, однако для этого требуются значительные инвестиционные затраты и время, тем самым, это экономически невыгодно. Поэтому создание децентрализованных систем энергоснабжения является правильным и разумным решением этих проблем.

На данный момент большая часть децентрализованного энергоснабжения в России основана на дизельных электростанциях, которые широко применяются в качестве основного источника. Например, Республика Якутия, которая простирается до 2,2 миллиона километров территории и охватывает 150 тысяч человек, снабжается электроэнергией 129 автономными дизельными электростанциями [12].

Согласно статистике, более пяти тысяч дизель-генераторов, работающих в стране, производят около 1,8 млрд. кВтч электроэнергии с годовым расходом топлива 6-8 млн. тонн. Эти 6-8 миллионов тонн топлива поставляются железнодорожным или автомобильным видом транспорта, а иногда и вовсе воздушными путями. Такие виды поставок очень дороги и ненадежны. Кроме того, отмечается, что топливо становится дороже, а цены будут расти только в будущем. Рост цен на топливо приводит к увеличению транспортных тарифов. Таким образом, затраты на транспортировку также растут. Что касается текущей ситуации, то стоимость произведенной электроэнергии составляет до 25-40 рублей за кВтч, а средняя стоимость электроэнергии для населения в централизованных районах составляет 2,5-3,5 рубля за кВтч. В некоторых конкретных регионах стоимость может составлять 125 руб/кВтч. Помимо транспортных расходов и расходов на топливо,

еще одной важной причиной такой значительно высокой цены является стоимость необходимого технического обслуживания и ремонта дизель-генераторов [13].

Можно выделить следующие основные проблемы использования двигатель-генераторных установок в качестве единственных источников электроэнергии:

- высокая стоимость электроэнергии за счет повышенного расхода, затрат на доставку и хранения топлива;
- низкие показатели экологической безопасности, в том числе акустическое загрязнение и выбросы токсичных веществ;
- низкая топливная экономичность и повышенные затраты на техническую эксплуатацию и обслуживание вследствие работы ДВС на режимах малых нагрузок.

Основываясь на приведенном выше обсуждении, разумно обратить внимание на децентрализованные системы энергоснабжения на основе возобновляемых источников энергии. Существует ряд научных публикаций, в которых широко рассматривается анализ автономных систем для децентрализованных областей в России. По результатам можно сделать вывод, что отдаленные районы России – отличная стартовая платформа для внедрения возобновляемых источников энергии.

1.3. АВТОНОМНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

После рассмотрения предыдущей главы, децентрализованные энергетические системы на основе ископаемого топлива, а также возобновляемые источники энергии являются текущими практическими решениями для удаленных потребителей без возможности подключения к централизованной электрической сети. Необходимость в автономных энергетических системах существует из-за таких факторов, как независимость от электросети (например, аварии, ремонт), отсутствие платы за подключение и затраты на строительство линий электропередач, независимость от глобального энергетического кризиса и т.д.

Следовательно, необходимо привести ключевые параметры и основные требования к данным системам энергоснабжения.

Основные требования к системам электроснабжения

1. Система электроснабжения должна обладать соответствующим уровнем надежности и обеспечивать бесперебойное питание электроэнергией главного оборудования. Под бесперебойным питанием подразумевается электропитание, при котором допускается кратковременное ухудшение показателей качества электроэнергии.

2. Технологичность при монтаже и экономичность при эксплуатации являются. Выбор структуры системы питания электроэнергией и оборудования должен проводиться на основе технико-экономических показателей за счет сравнения нескольких вариантов построения.

3. Постоянный местный и дистанционный технический контроль и управление режимами работы являются следующими требованиями системы электроснабжения. Все неисправности и аварийные состояния должны определяться в обозначенном порядке, диагностироваться и передаваться сервисной службе.

4. СЭП должна удовлетворять следующим показателям надежности, к которым относятся – средняя наработка на отказ (T_0), среднее время восстановления (T_B) и средний срок службы.

5. СЭП должна быть эффективной с точки зрения преобразования электрической энергии.

6. Качество электроэнергии на выводах должно соответствовать установленным нормам качества.

7. СЭП должна выполняться в соответствие с требованиями безопасности.

8. Отсутствие вредного влияния на окружающую среду;

9. Обеспечение удобства и безопасности работ персонала.

10. Возможность частых перестроек технологии производства и развития предприятия;
11. Полная автоматизация технологического процесса производства энергии;
12. Простота системы
13. Возможность масштабирования (доступный диапазон действующих установленных мощностей)
14. Управляемость источника питания (или маневренность)

Помимо перечисленных выше параметров, которые характеризуют автономные энергетические системы, наиболее важными являются доступность источников энергии и характерный график нагрузки объекта. Объектом исследования в данной работе является метеорологическая станция (метеостанция). Метеорологическая станция расположена в восточно-южной части России, Республика Бурятия. Объект имеет 1.4 кВт максимальной нагрузки, а его график нагрузки представлен на рисунке 18. Более подробное описание объекта представлено в 4.

Очевидно, что дизель-генераторная установка автоматически рассматривается как потенциальный источник энергии объекта. Несмотря на количество проблем, описанных ранее, эти электростанции обладают более мощными преимуществами, такими как надежность и стабильность выходной мощности, высокий коэффициент эффективности, автоматизация процессов, быстрый запуск и высокая маневренность, простота установки и низкие инвестиционные затраты. В результате дизель-электростанция соответствует всем ключевым параметрам автономных систем. Также нет никаких технических и финансовых ограничений на установку дизель-генераторной электростанции. С другой стороны, основными недостатками данной электростанции являются высокие эксплуатационные расходы, выбросы от сжигания топлива и негативное социальное воздействие.

Поскольку есть возможность запитать объект не только на базе дизель-генераторной установки, следовательно, децентрализованная система энергоснабжения на основе ВИЭ будет рассмотрена. На основе информации, представленной ранее, использование ВИЭ в составе систем ДЭС может внести существенный вклад в решение проблем децентрализованных потребителей. Данные системы можно классифицировать по типу энергии:

- ветровая энергия
- энергия биомассы
- геотермальная энергия
- малая гидроэнергетика
- солнечная энергия

Однако возникает важный вопрос о доступности таких источников. Поэтому необходимо провести исследование о потенциале возобновляемых источников энергии в России и в регионе, где расположен объект. Следующий подраздел будет посвящен данному вопросу.

1.4. ПОТЕНЦИАЛ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ В РОССИИ

Российская Федерация обладает достаточно высоким потенциалом ВИЭ. В России имеется все возможные ресурсы: гидроэнергетика, энергия биоэнергетики, геотермальная энергия, биомасса и солнечная энергия. Большинство регионов имеют, по меньшей мере, один или два варианта ВИЭ, которые являются коммерчески осуществимыми, в то время как некоторые из этих областей в изобилии встречаются во всех видах ВИЭ. Несмотря на свое энергетическое и экономическое состояние, и существующие масштабы добычи ископаемого топлива, в настоящий момент Российская Федерация использует небольшую часть своего огромного потенциала. Около 21% электроэнергии в России производится

гидроэлектроэнергией, и менее 1% от общей установленной мощности в стране производится другими источниками возобновляемой энергии [13].

К концу 2015 года общая установленная мощность возобновляемой энергии достигла 53,5 ГВт, где около 20% общей установленной мощности генерируемой мощности России (253 ГВт). Большая часть этой мощности представлена гидроэнергетикой (51,5 ГВт), биоэнергетикой (с 1,35 ГВт) [14]. Установленная мощность для солнечной и ветровой энергии составляет около 460 МВт и 111 МВт соответственно. Согласно докладу «Возобновляемая энергетическая политика в России», Россия подготовила подробный прогноз использования энергии и намерена достичь к 2020 году 4,5% от общего объема производства и потребления электроэнергии из возобновляемых источников [15]. Этот шаг дал положительные сигналы развитию этого сектора.

Энергетический потенциал возобновляемых источников энергии в России можно оценивать по-разному в зависимости от технических и экономических аспектов их использования. С каждой точки зрения необходимо найти валовой потенциал, технический потенциал и экономический потенциал ВИЭ.

Валовой потенциал - это количество энергии, вырабатываемое данным типом энергетического ресурса в случае ее полного полезного использования. Технический потенциал является частью валового потенциала. Это полезная энергия, которая разумна при определенном уровне технического развития. Экономический потенциал является частью технического потенциала. Это полезная энергия, экономически осуществимая в конкретных экономических условиях (цена на топливо, электроэнергию и тепло, цену на оборудование и материалы, транспорт и рабочую силу). В таблице 3 представлена оценка потенциальных ВИЭ России по оценкам российских экспертов.

Таблица 3 – Оценка потенциала возобновляемых источников энергии в России [16]

Resources	Gross potential, million tons of reference fuel/year	Technical potential, million tons of reference fuel/year	Economic potential, million tons of reference fuel/year
Wind	$26 \cdot 10^3$	2000	10
Small hydropower	360,4	124.6	65,2
Solar	$2,3 \cdot 10^6$	2300	12,5
Biomass	$10 \cdot 10^3$	53	35
Low- temperature heat	525	115	36
Total	$2,34 \cdot 10^6$	4593	273,5

Принимая во внимание экономический потенциал, степень ВИЭ оценивается примерно в 30% от общего объема производства энергии, технический потенциал оценивается более чем в пять раз по сравнению с общим объемом производства первичной энергии в России. Таким образом, ВИЭ, такие как ветер, биомасса, геотермальная, малая гидроэнергетика и солнечная энергия, которые широко распространены в России, будут более подробно рассмотрены в качестве потенциального источника энергоснабжения объекта [17].

1.4.1. Ветровая энергия

Самый высокий потенциал ветроэнергетики в России сосредоточен вдоль прибрежных районов и островов Арктики и Тихого океана. Кроме того, зоны для развития ветроэнергетики расположены в северных районах Дальнего Востока, на полуострове Камчатка, где средняя скорость ветра превышает 6 метров в секунду

[7]. Распределение средних скоростей ветра на территории страны представлено на карте (Приложение 1). Средние скорости ветра значительно различаются в ежедневных и годовых циклах. Следовательно, энергия ветра имеет нестабильные характеристики и быстрые колебания, которые сопровождаются резкими изменениями выходной мощности. По данным ветрового кадастра России, только 40% (включая вышеописанные регионы) территории России могут быть использованы для выработки электроэнергии. Сравнивая карты, представленные в Приложении 1 и Рисунок 2, можно заметить, что большая часть потенциала ветра находится в тех регионах, где плотность населения низкая (менее одного человека на 1 км²). Мощность ветра обычно оценивается с использованием средней скорости ветра. Поскольку объект исследования имеет небольшую установленную мощность, диапазон минимальной требуемой скорости ветра составляет 2,5-3 м/с. Согласно статистическим данным, получены результаты о низкой средней годовой скорости ветра (ниже 2,4 м/с). Таким образом, можно сделать вывод, что использование ветровой энергии для электроснабжения неэффективно в районе метеорологической станции [18].

1.4.2. Энергия биомассы

Потенциал широкомасштабного и эффективного использования биомассы в некоторых регионах России довольно высок. По данным «Интерсоллар-центра», российской компании, которая занимается возобновляемыми источниками энергии, Россия ежегодно производит около 15 миллиардов тонн биомассы, что составляет около 8 миллиардов тонн эталонного топлива в энергетическом эквиваленте [13]. Однако существуют серьезные ограничения использования биомассы для производства энергии. Проблема эффективной переработки и сжигания биомассы по-прежнему актуальна. Это связано с тем, что биомасса состоит из низкосортных видов топлива с высоким содержанием влаги (до 85%). Поэтому он требует

дополнительных затрат на сушку и предварительную обработку (шлифование, прессование и т.д.). Наиболее распространенным методом получения энергии из биомассы является сжигание. Процесс сжигания имеет свои трудности: во-первых, разные виды биомассы требуют разных устройств для обжига, а во-вторых, установки для прямого сжигания биомассы являются относительно неэффективными и неустойчивыми энергетическими системами. Кроме того, параметры окружающей среды печей должны соответствовать применимым стандартам выбросов. Кроме того, производство биотоплива оправдано, если пополнение запасов дешевого сырья используется без перерывов. Примерами запасов дешевого сырья могут быть отходы животных, опилки, коммунальные отходы, соломенные крупы и т.д. Очень важно оценить возможные потоки соответствующего сырья. Если сырья нет, его сбор может быть технически и экономически непростым. Кроме того, для создания энергетической системы требуется специальная инфраструктура для переработки биотоплива. Поэтому энергия биомассы для энергоснабжения объекта не рассматривается.

1.4.3. Геотермальная энергия

В последние годы Россия добилась прогресса в развитии геотермальной энергетики. В настоящее время почти все территории России изучены, и в ходе исследований было обнаружено, что имеется ряд регионов с большими запасами геотермальных ресурсов. Согласно карте в Приложении 2, красный цвет показывает высокотемпературные геотермальные ресурсы (150°C и выше), которые подходят для производства электроэнергии. Зеленый цвет показывает низкотемпературные геотермальные ресурсы ($90-100^{\circ}\text{C}$), которые подходят для централизованного теплоснабжения и сельского хозяйства. Розовый цвет представляет собой геотермальные ресурсы средней температуры ($90-100^{\circ}\text{C}$ - 150°C), которые подходят для бинарных электростанций. Согласно карте, можно определить, что

только на Камчатском полуострове, на Курильских островах и на Северном Кавказе существует геотермальная энергия достаточная для производства электроэнергии. Республика Бурятия, где находится объект, обладает только низкотемпературными геотермальными ресурсами (90-100 °C), поэтому геотермальная энергия становится неприемлемым вариантом энергоснабжения объекта [13].

1.4.4. Малая гидроэнергетика

В России, гидроэнергетика является наиболее развитой отраслью среди всех возобновляемых источников энергии. Малые реки составляют примерно 46% от общего гидроэнергетического потенциала. Большая часть гидроэнергетических источников расположена в Восточной Сибири, на Дальнем Востоке, на Северном Кавказе и в западной части Урала [7]. Приложение 3 показывает текущую ситуацию с гидроэнергетическими ресурсами в России. Очевидно, что малая гидроэнергетика играет ведущую роль в энергообеспечении децентрализованных регионов России, но следует отметить, что в районах не всегда имеются водные ресурсы. Помимо этого, строительство гидроэлектростанции требует огромные площади. Также важным фактором является то, что производство энергии гидроэлектростанций - пропорционально потоку воды. Поток воды должен быть большим и достаточно быстрым, чтобы обеспечить надежность, что также не всегда можно получить. Однако небольшие гидроэлектростанции имеют множество преимуществ. Строительство небольшой гидроэлектростанции для метеорологической станции не рассматривается ввиду большого расстояния от ближнего возможного энергоресурса. Ближайший источник – это река «Хилок», которая расположена в 30 км.

1.4.5. Солнечная энергия

Россия расположена между 41 и 82 градусами северной широты, а уровни солнечной радиации значительно различаются на обширной территории страны. Тем не менее, Россия обладает огромным потенциалом для развития солнечной энергетики. По оценкам, солнечная радиация в отдаленных северных районах составляет 810 кВтч/м² в год, тогда как в южных регионах она составляет более 1400 кВтч/м² в год. Средняя солнечная инсоляция равна 1200-1500 кВтч в год [13].

Существует ошибочное мнение относительно полезности использования солнечной энергии в Российской Федерации из-за недостаточного уровня поступающей солнечной радиации. На рисунке 3 показано годовое распределение среднесуточной солнечной радиации на территории России, разработанное РАН. Таким образом, государственное учреждение науки «Объединенный институт высоких температур» Российской Академии Наук может опровергнуть такие мнения в соответствии с полученными данными.

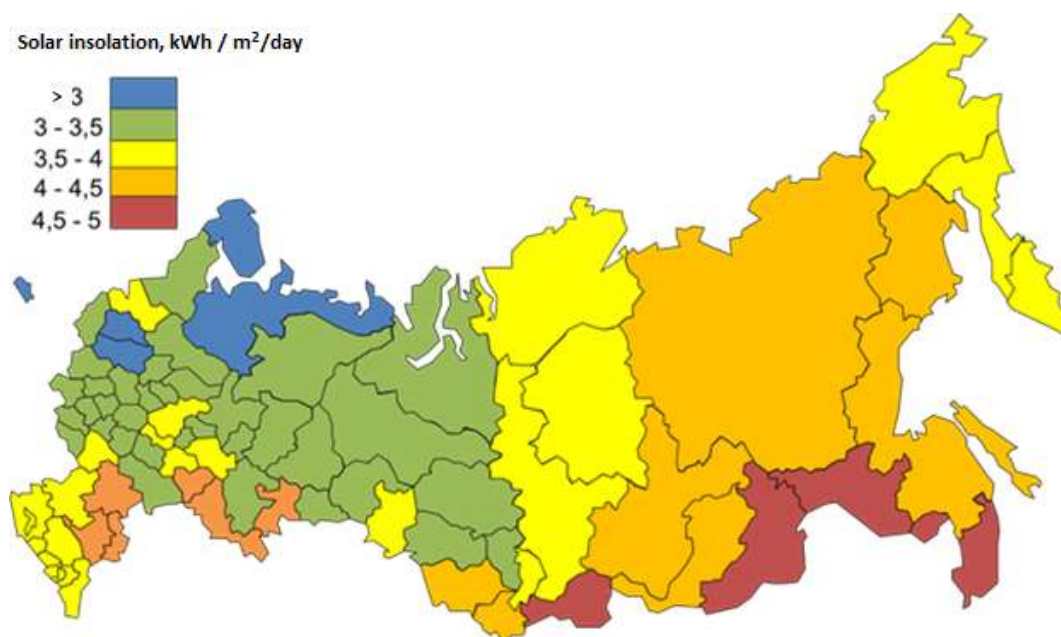


Рисунок 3 – Ежегодное распределение среднесуточной солнечной радиации на территории России [8]

Самый высокий потенциал солнечной энергии располагается на юго-западе (Северный Кавказ, Черное море и Каспийское море), в Южной Сибири и на Дальнем Востоке. Калмыкия, Ставропольский край, Ростовская область, Краснодар, Волгоградская область, Астраханская область и другие регионы на юго-западе, а также Алтай, Приморский край, Читинская область, Республика Бурятия и другие регионы на юго-востоке, также имеют высокий потенциал солнечных ресурсов. Например, в Иркутске (52 градуса северной широты) количество солнечной энергии достигает 1340 кВтч/м² в год, а в Республике Саха-Якутия (62 градуса северной широты) - 1290 кВтч/м² в год [19].

По результатам следующих исследований [20], [21], [22], [23] можно сделать вывод, что солнечные электростанции уже оправданы для реализации в Российской Федерации. Есть несколько хороших примеров солнечных электростанций, которые в настоящее время работают в России. В мае 2015 года в Оренбургской области была открыта солнечная электростанция мощностью 5 МВт. В октябре в Республике Башкортостан была создана солнечная электростанция мощностью 10 МВт. Кроме того, в Орске была открыта одна из крупнейших солнечных электростанций общей мощностью 25 МВт. В Республике Хакасия, Алтай и Якутия также начали действовать новые солнечные электростанции. Проекты солнечных установок развиваются и в Краснодарском крае, и в Астраханской области.

Исследования показывают, что Республика Бурятия является одним из наиболее перспективных регионов России для создания небольших и крупномасштабных (более 10 МВт и выше) фотоэлектрических систем для производства электрической энергии. Более того, российская компания «Avelar Solar Energy» уже приступила к строительству 6 фотоэлектрических электростанций общей мощностью 105 МВт в Республике Бурятия.

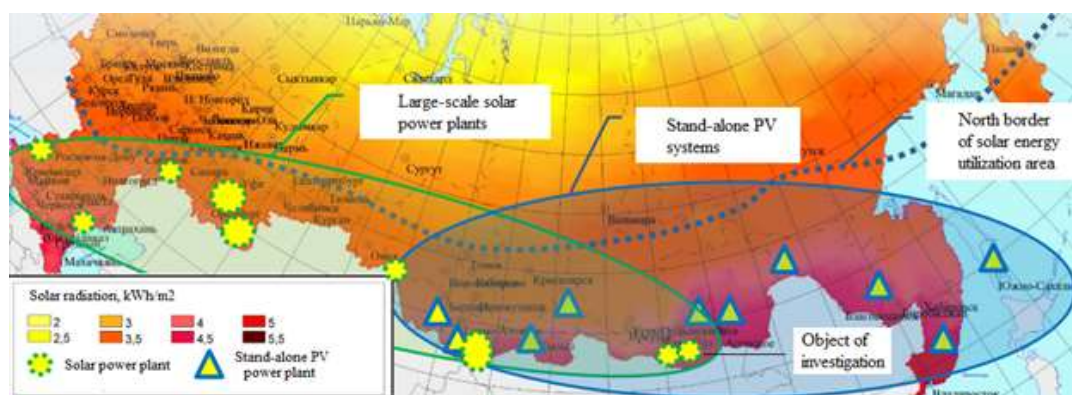


Рисунок 4 – Потенциальные зоны для строительства солнечных электростанций на территории России [8]

В результате исследования, можно заключить, что солнечная энергия имеет самый высокий потенциал. Учитывая потенциал и наличие свободного пространства на территории, а также возможное падение цен на фотоэлементы и новую политику в области возобновляемых источников энергии в стране, было установлено, что восточно-южная часть России считается подходящим местом для строительства PV-систем для работы в качестве автономной системы электроснабжения.

Развитие фотоэлектрических станций

Солнечная энергия, похоже, является эффективным решением проблемы энергетики и окружающей среды. В настоящее время среди различных типов технологий и устройств солнечной энергии фотоэлектрическое преобразование солнечной радиации является одним из перспективных способов производства электрической энергии. Признание этих систем обусловлено текущей динамикой объема генерируемой энергии. На рисунке ниже представлена мировая установленная мощность фотоэлектрических систем, где можно отметить значительный рост фотоэлектрических систем за последние пять лет. А.П. Ландсман, Лидоренко, В.С. Вавилов В.К. Субашиев, И.И. Алферов В.С. Стребков и

многие другие авторы внесли огромный вклад в развитие фотогальванических систем [24].

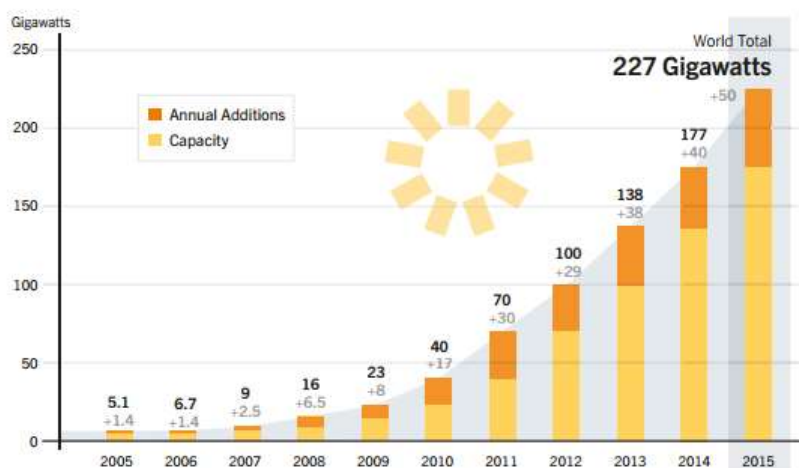


Рисунок 5 – Мировая установленная мощность фотоэлектрических систем, 2005-2015 гг [25].

Только за последние пять лет годовой темп роста производства требуемого солнечного фотоэлектрического элемента достигает около 30%. Рынок солнечной энергии быстро растет. Глобальные цены на фотоэлектрические модули упали примерно на 80%. Очевидно, что изменение цен в мире оказывает значительное влияние на российский рынок солнечной энергии. Поэтому можно сделать вывод, что нынешний темп развития солнечной энергии и падение цен делают PV-индустрию более доступной для всех целей в России. Применение фотовольтаической системы становится все более конкурентоспособным.

В заключение, в данном разделе был исследован потенциал каждого из доступных возобновляемых источников энергии, чтобы определить возможные решения для обеспечения электроэнергией объекта исследования. Среди рассмотренных выше источников энергии можно сделать вывод, что автономная энергетическая PV-система является наиболее подходящим источником энергии объекта. Поэтому

было принято решение использовать PV-системы для дальнейшего более
детального изучения.

2. ECONOMIC EVALUATION

2.1. METHODOLOGY

In order to verify the viability of the proposed technical solutions of power supply to meet the requirements of the meteorological station at reasonable costs, the net present value technique is undertaken. The NPV is the standard method to evaluate the effectiveness of investment projects. It compares the amount which has been invested today with the future discounted returns. In this case study, the calculation of NPV is made with the help of Microsoft Excel. The values of the minimum price will be compared to each other.

The NPV can be defined by using the following formula:

$$NPV = \sum_{t=1}^T CF_t \cdot (1 + r_d)^{-t} - I_0$$

Where:

T – lifetime of the project, year;

t – considered year of the project, year

CF_t – cash flow of the project during the period t , RUB;

r_d – discount rate, %;

I_0 – total investment costs, RUB;

This project is considered from the point of view of the Russian Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet state non-profit organization). Therefore, this project does not consider the revenues over the whole operational period. The total initial investment costs in the beginning of the project and the operating costs in the following years will be implemented into the economic model.

The minimum price per 1 kWh can be easily derived from the condition that the NPV indicator is equal to zero. To achieve this, the fictive revenues from the sale of produced electricity are implemented into the economic model.

In this case study, the lifetime of the project is 25 years, although the system's lifetime could be reasonably expanded. The whole generated electricity of the power systems supplies the object itself. The land size is not considered since there are no limitations of space on the territory of the object. Therefore, this does not affect the decision.

2.1.1. Discount rate

The most important factor which has the greatest impact on results is discount rate. The discount rate is the rate that takes into account the time value of money, the risk, and uncertainty of the future cash flows. Consequently, the determination of discount rate must be done appropriately and correctly in order to avoid overestimated values, or vice-versa underestimated values. Therefore, according to the type of above-described investor (non-profit state organization Roshydromet) and discussion with the supervisor, the nominal discount rate of the project is determined as the nominal discount rate of the Russian government bond with the same time of maturity as the project and equals to 9.00 % [65].

2.1.2. Inflation rate

According to statistical data of the Federal Service of State Statistics, the inflation level was 5.4% in the year of 2016, against 12.9% in 2015. In 2014 the inflation level was 11.4%. Such big difference can be explained by a devaluation of the Russian ruble. However, today the ruble has become more stable and more independent, which has a positive effect on the economy of the country. The ruble is appreciating. In 2017 the situation in the economy will be completely stabilized. According to the Central Bank of Russia in moderate and strict conditions of the monetary policy, the targeted level of inflation of 4% will be reached by the end of 2017 and will be at the same position during

following two-three years [66]. But at the same time, inflation risks are still remained. Therefore, based on the long-term predictions of the Economic Development Ministry, the inflation rate of the project is determined as 5.3 % [67].

2.1.3. Fuel price growth rate

The prices of fuel have a tendency of constant growth. According to the report “Dynamics of prices for fuel” of the Russian government, in 2011-2015, the retail prices of fuels - petroleum and diesel – grew by one-third approximately corresponding to the inflation rate of the economy for the same period. The Russian analysts for oil and gas predict the petroleum prices to grow in 2017-2020. Prices will increase by the average of 6 – 7%, or 2 - 4 RUB per liter for petroleum. The growth of prices is inevitable. Accordingly, the annual growth of fuel prices of the project is estimated as 6.5% [68].

2.2. INPUT DATA

2.2.1. Investment costs

First of all, it is necessary to note that the total initial investment costs of PV systems strongly depend on the conditions of the individual countries, for example, the maturity and size of the market as well as the renewable energy policy. Therefore, in this case study, the investment costs were identified based on the statistical analysis of current prices of equipment on the Russian market for the year 2017. All system equipment is produced by domestic manufacturers. The prices are found on the manufacturer’s web-site [53], [60], [62]–[64], [69]. The initial total investment costs of generator set variant, the optimally tilted PV system and the PV with solar tracker are presented in **Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.**, and **Error! Reference source not found.**, respectively.

Table 18 – Investment costs of generator set variant

Component	Brand	Units	The price, RUB
Variant 1. Generator set variant			
Generator including ATS	KIPOR KGE2500E	1	65 000
Backup generator	KIPOR KGE2500E	1	35 000
Other equipment	Include: protection and measurement devices, monitoring system		21 750
Fuel tank	3500 l	1	45 000
Total system price			166 750
Installation & shipping			33 350
Project documentation			21 750
Total investment costs			210 250

Table 19 – Investment costs of optimally tilted PV system

Variant 2. Based on optimally tilted PV system			
Solar panel	FSM-250	16	240 000
Inverter	MAP-SIN-PRO-48-3	1	45 000
Controller	MPPT DOMINATOR 200/100	1	35 000
Battery	GEL DELTA GX 12-200	8	256 000
Generator	KIPOR KGE2500E	1	65 000
Other equipment: PV + generator	Includes: protection and measurement devices, cables, monitoring system, constructions		86 400 + 11 500
Fuel tank	1000 l	1	10 000
Total price: PV system + generator set			662 400 + 85 400
Installation & shipping			157 700
Project documentation			37 500
Total investment costs			943 000

Since the object is located in the remote area, geographical conditions and transportation issues are taken into account. Therefore, the site preparation, installation and shipping costs of power supply systems to the region of the object is estimated as 20% of the total investment costs. The other equipment including protection and measurement devices, cables, supporting structures and monitoring systems of all variants is estimated as 15%

of the total price of the main equipment. The project documentation is estimated as 5% of the total investment costs. The above-described estimations for PV systems were determined according to the commercial proposal of the “UNISOLEX”, “EDS Group”, “Akvaliya”, and “Generacom” companies. [64], [70]–[72]

Table 20 – Investment costs of PV system with tracker

Variant 3. Based on PV system with dual-axis tracking			
Solar panel	FSM-250	12	180 000
Solar tracker	ED-2500 DUAL	1	280 000
Inverter	MAP-SIN-PRO-48-3	1	45 000
Controller	MPPT DOMINATOR 200/100	1	35 000
Battery	GEL DELTA GX 12-200	8	256 000
Generator	KIPOR KGE2500E	1	65 000
Other equipment: PV + generator	Includes: protection and measurement devices, cables, monitoring system, constructions		119 250 + 11 500
Fuel tank	1000 l	1	10 000
Total price: PV system + generator set			915 400 + 87 000
Installation & shipping			213 000
Project documentation			63 500
Total investment costs			1 279 000

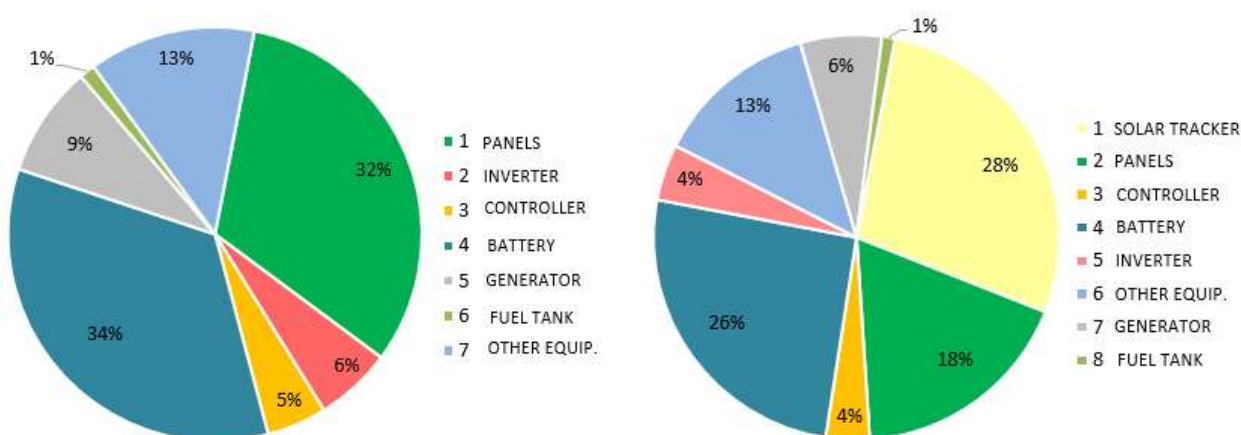


Figure 31 – Share of system costs: optimally tilted PV system (left), PV with solar tracker (right)

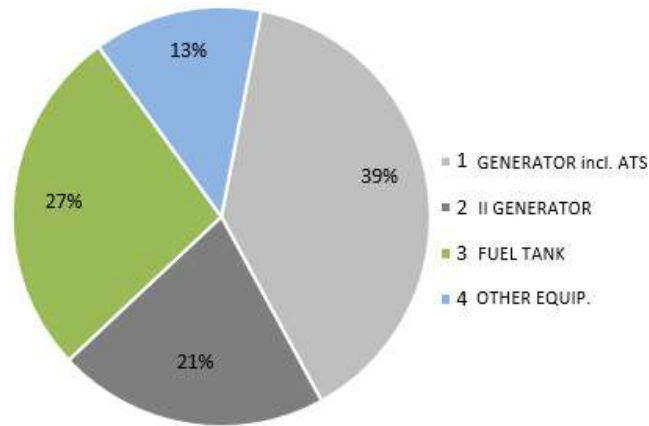


Figure 32 – Share of system costs: generator set

2.2.2. Operating costs

Operating costs are the annual costs incurred by a continuous process. In this project, the operating costs are expenses associated with the maintenance of generator, maintenance of PV systems, fuel consumption and its transportation, an insurance of the systems. These costs are taken into account every year from the beginning of the operation process. The important economic parameters concerning to the operating costs are presented in the **Error! Reference source not found..**

Fuel and transportation costs

In this work, the fuel costs are calculated (formula below) with the help of the fuel consumption of generator, the current price of fuel in the region and the predicted growth of fuel prices in the future.

$$C_{fuel} = Q_g \cdot P_f \cdot (1 + r_{fuel})^t$$

Where:

Q_g – the amount of liters consumed per year, l;

P_f – current price of fuel in the region, RUB;

r_{fuel} – rate of fuel prices growth, %;

Taking into account the location of the object, the fuel transportation costs are calculated according to: required volume of fuel (depends on the variant of the power supply system); traveling costs - 500 RUB/hour, where the distance to the object from the center of Ulan-Ude town is equal to 115 km. The cost of fuel transportation per liter is defined as 2 RUB/l according to the online calculator of “Magnum oil” company which allows to calculate the cost of fuel transportation for every distance in Russia. [73] The current price of fuel in the region is 36.5 RUB/l [74].

Maintenance costs

Generator variant

Maintenance is one of the important factors in analyzing the technical as well as the economic performance of generator power plant. The maintenance is the basis of efficient operation of a generator power plant and reliable prevention of severe damage and breaking. Moreover, serious attention must be paid to the scheduled maintenance of generator because the proper maintenance is the reason behind the long duration of work. In this case study, all the functions of the generator controlling and managing are automated, and the constant presence of personnel is required only during the maintenance cycle. For generators with power less than 10 kW, the regular maintenance should be provided each 500 - 800 operating hours depending on the type of maintenance [52]. In this case, it was accepted to provide the maintenance after each 800 operating hours (about 11 events per year). Such maintenance includes the following services: oil change, replacing oil and fuel filter elements, engine coolant replacement, test run with diagnostics of parameters, cleaning the cylinder head, nozzles, gaskets. The cost of maintenance for less than 10 kW generator is estimated at 8000 rubles per event including the following components: the cost of travel to the place, service, and time spent for the service [70].

Both PV system variants

PV systems are reliable, low-maintenance power sources. Nonetheless, they require some annual maintenance in order to identify problems before they even arise and to ensure the high performance of systems. In this case study, maintenance of optimally tilted PV system is equal to 1.50 % of the total system costs. Such costs include inverter and controller maintenance, cleaning of panels, general overhead and field repairs. Apart from that, the PV system without tracker requires to adjustment of the panel's position during the operational period (two times per year). Accordingly, this work takes into account the work which provides such service. According to the company "UNISOLEX", the service is estimated at 3000 RUB per event. In the case of PV system with dual-axis tracking, the maintenance is equal to 1.50 % of the total system costs as well. The maintenance of such systems increases by 28% comparing with optimum tilted PV system's maintenance costs. Estimations of maintenance costs are based on the discussion with representatives of the companies "UNISOLEX", "EDS Group", and "Generacom" [75]–[77].

2.2.3. Insurance

Insurance is necessary in order to cover the losses of external (e.g. wind and storm) and internal causes (e.g. material and construction defects) as well as losses due to short-circuits, human factors and data losses. Therefore, it was decided to consider the insurance of each variant as 1% of total investment costs.

2.2.4. Reinvestment of equipment

Every device and equipment have its own lifetime or a limited number of operating hours, thus, this important factor will be taken into consideration.

- Batteries. According to the calculations, the lifetime of GEL GX batteries is defined and equals to approximately seven years once DOD is equal to 30%.
- Generator. The service lifetime of the generator set is estimated 40000 operating hours according to [52]. In this case study, the lifetime substantially depends on the variant of power supply system. In the case of generator set variant, the

calculations define this lifetime equals to five years for the first generator and nine years for the second generator. As for the variant with optimally tilted PV system, the lifetime of generator is 20 years. The PV system with tracker has the generator lifetime equals to 17 years.

- Inverter and controller. According to the manufacturers, the average lifetime of devices is ten years. Thus, ten years is considered as the lifetime of these devices.
- PV panels, solar tracker, and fuel tank. These elements have longer lifetime than lifetime of the project. Solar trackers have lifetime more than 25 years. Fuel tank's lifetime is considered as 45 years. PV panels have no less than 30 years. The degradation rate of solar panels is estimated as 0.73%. [78] To the end of the project lifetime, the performance of PV panels is expected to be 80.2%. Despite fact that PV panels are losing their performance (efficiency), the additional PV panels can be bought after the lifetime of the project in order to satisfy energy requirements.

All above described input economic parameters are concluded in **Error! Reference source not found..**

Table 21 – Input economic parameters

Parameter	Value
Lifetime of project	25 years
Price of fuel	36.5 RUB/l
Price of fuel transportation	2.00 RUB/l
Fuel price growth rate	6.50 %
Maintenance of generator	8000 RUB/event
Adjusting panel (Service)	3000 RUB/event
Maintenance of PV	1.50 % (from total system cost)
Maintenance of PV + tracker	1.50 % (from total system cost)
Degradation rate	0.73 %
Insurance	1.00 % from total investment costs

Inflation	5.30 %
Discount rate	9.00 %

2.3. ECONOMIC RESULTS

For every technical solution of energy supply the economic model is created. The cash flow of each variant is presented in **Error! Reference source not found., Error! Reference source not found..** Based on the presented methodology, the results of the NPV and the minimum price are obtained and presented in the table below.

Table 22 – Economic results

	Variant 1	Variant 2	Variant 3
Minimum price, RUB/kWh	37.18	25.55	29.68
Net Present Value, mil. RUB	- 4.13	- 2.84	- 3.3

According to the table, the highest NPV relates to optimally tilted PV system variant. The NPV of PV system with solar tracker differs from the optimally tilted PV system by 459 thou. RUB. Comparing two variants based on PV systems, there are a number of powerful factors that have an influence on the presented economic results. The first factor is the cost of the solar tracker which plays a fundamental role in decision making. It's clear that the price of 280 thou. RUB for solar tracker makes this variant unfeasible. Therefore, a sensitivity analysis of NPV on the cost of solar tracker is conducted in order to identify the price that would be acceptable for construction of PV system using solar tracking. The second factor which has an impact on the final NPV is that the solar tracker requires more maintenance costs due to its complex technology, control system, and moving parts. According to the discussion provided in the chapter 3, the third factor is the performance of sun tracking in the conditions of the winter period when there is a substantial need for energy.

However, comparing with the generator set variant that has the worst NPV value, both PV systems show better results. The difference between the NPV of generator set variant and optimally tilted PV system is 1 290 thou. RUB. PV with the tracker has the higher value of NPV by 831 thou. RUB. There are some solid reasons for the significantly high difference. According to the results of the technical evaluation presented in chapter 3, implementation of PV panels in the energy balance of supply system makes an enormous contribution to reducing the operating hours of the generator (optimally tilted PV system – 6728 hours, in the case of PV with tracker – 6474 hours) and extending its lifetime. Thereby PV systems reduce the consumption of fuel (2681 l for optimally tilted PV system and 2590 l for PV system with tracker) and, especially, the maintenance costs (the number of events is reduced to three times for both optimally tilted PV system and PV system with the solar tracker).

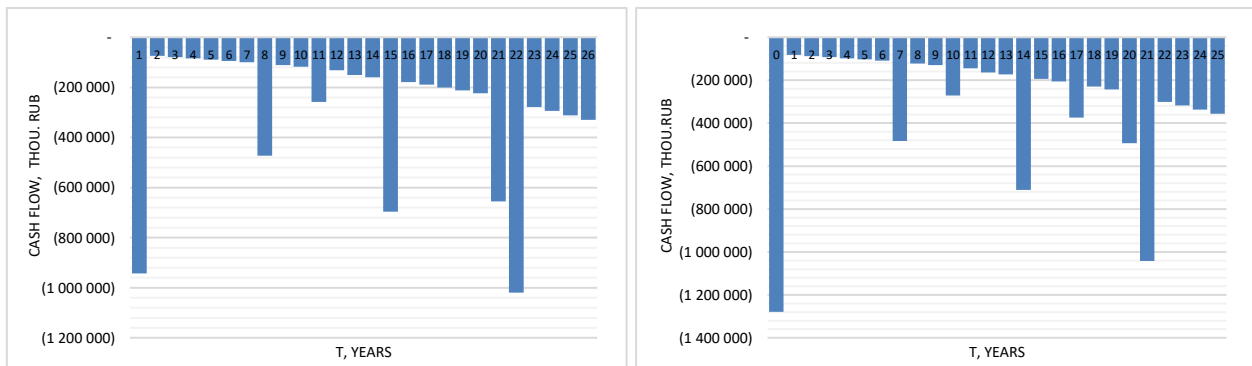


Figure 1 – Cash flow: Optimally tilted PV system (left), PV system with tracker (right)

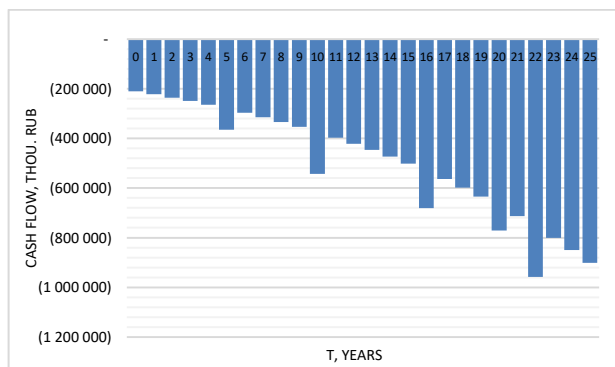


Figure 33 – Cash flow: generator set

Comparison of the variants

Total cost comparison of the projects is carried out in order to identify how much one project is more viable than another. Such evaluation of the effectiveness of the considered variants requires investment costs and operating costs of both projects. In order to define that indicator the formula below is used. The discount rate remains the same and equals to 9 %.

$$NPV_c = \sum_{t=1}^T (C_j - C_i) \cdot (1 + r_d)^{-t} - (I_i - I_j)$$

Where:

C_j – total costs of the project j;

C_i – total costs of the project i;

I_i – investment costs of the project i;

I_j – investment costs of the project j.

Profitability index:

$$PI = \frac{\sum_{t=1}^T (C_j - C_i) \cdot (1 + r_d)^{-t}}{(I_i - I_j)}$$

$$PI > 1$$

The economic indicators such as profitability index, payback period are also determined. The results of calculation are presented in Table 23.

Table 23 – Results of project's comparison

		Variant 1 is compared with Variant 2	Variant 1 is compared with Variant 3
NPV_c	mln. RUB	1 691	1 235
Profitability Index		3.31	2.15
Payback period	Years	5.8	9.6

It can be seen that the variant 2 (optimally tilted PV system) has the best values according to all presented economic indicators. Therefore, optimally tilted PV system is proved to be solution of power supply.

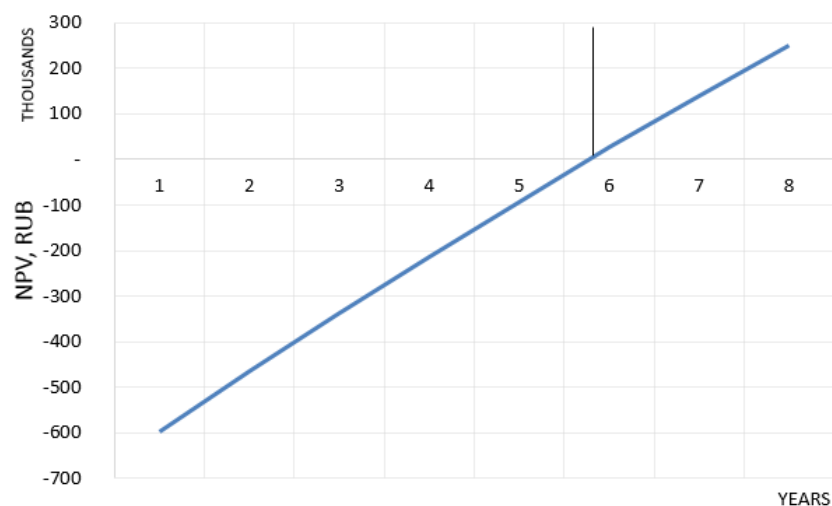


Figure 34 – Payback period of comparison of following variants: 1 and 2

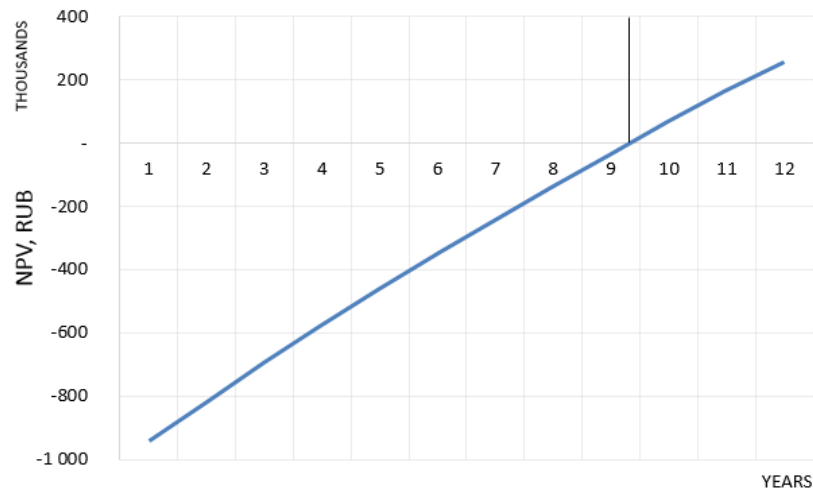


Figure 35 – Payback period of comparison of following variants: 1 and 3

2.4. SENSITIVITY ANALYSIS

The economic evaluation includes a number of input parameters the value of which is quite difficult to predict over a long period. Specialists of the US National Renewable Energy Laboratory recommend to use a sensitivity analysis for these purposes. The sensitivity analysis is applied to define the impact of different factors on system performance indicators. The idea behind the sensitivity analysis is quite simple: changing factors one by one and identifying the changes in the performance indicator - the Net Present Value, in this case. This subchapter will analyze the influence of the change of the following central factors on the performance of the power supply systems.

2.4.1. Sensitivity on fuel price

Since each variant has the generator in its composition, the essential factor that influences the economic results is fuel price. In this case study, the fuel price was accepted to equal 36.5 RUB/l, and the fuel price growth rate was estimated at 6.5%. As it was discussed at the beginning of the previous chapter **Error! Reference source not found.**, the fuel costs will only grow in the future. Accordingly, NPV dependence on the future possible growth of prices is presented for every variant in the figure below. It can be seen that this

parameter mainly influences the generator set variant. The great contribution (76.6% with the solar tracker and 79.2% without) in the energy balance of the overall supply system explains the weak influence of the variants based on PV panels. As the result, the future growth of fuel prices has a significant impact on the generator set variant, and it does not change the decision, the optimally tilted PV system still has the highest NPV.

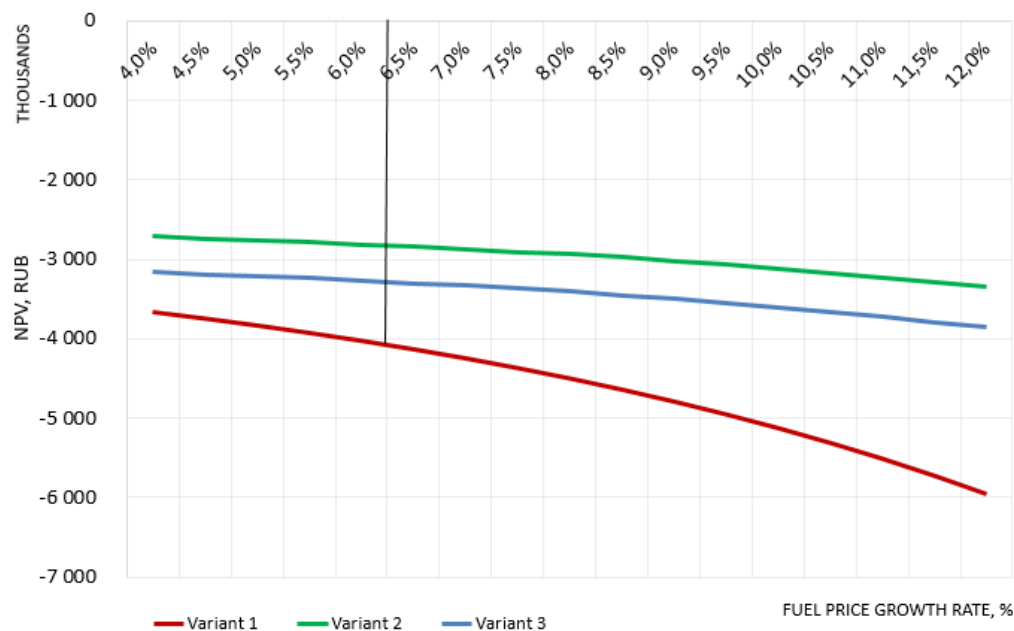


Figure 36 – NPV dependence on fuel price

2.4.2. Sensitivity on discount rate

Discount rate is a substantial factor that automatically requires a sensitivity analysis. The black thin line indicates the nominal discount rate of the project. There is a high NPV dependence of generator set variant on discount rate. Both PV systems have less NPV dependence the behavior of which is identically changing. It can be noticed from **Error! Reference source not found.**, that the change of discount rate influences the decision. The decision is changed in favor of the generator set variant when the level of nominal discount rate equals to 16.6 %.

The nominal discount rate depends on a macro economic indicator – inflation which has variable character. For instance, inflation has varied significantly for the last seven years

in Russia. Therefore, a high level of nominal discount rate can be easily distinguished. But according to the discussion in the subchapter **Error! Reference source not found.**, the inflation forecasting shows that the level of inflation higher than 6% has a substantially low chance in Russia.

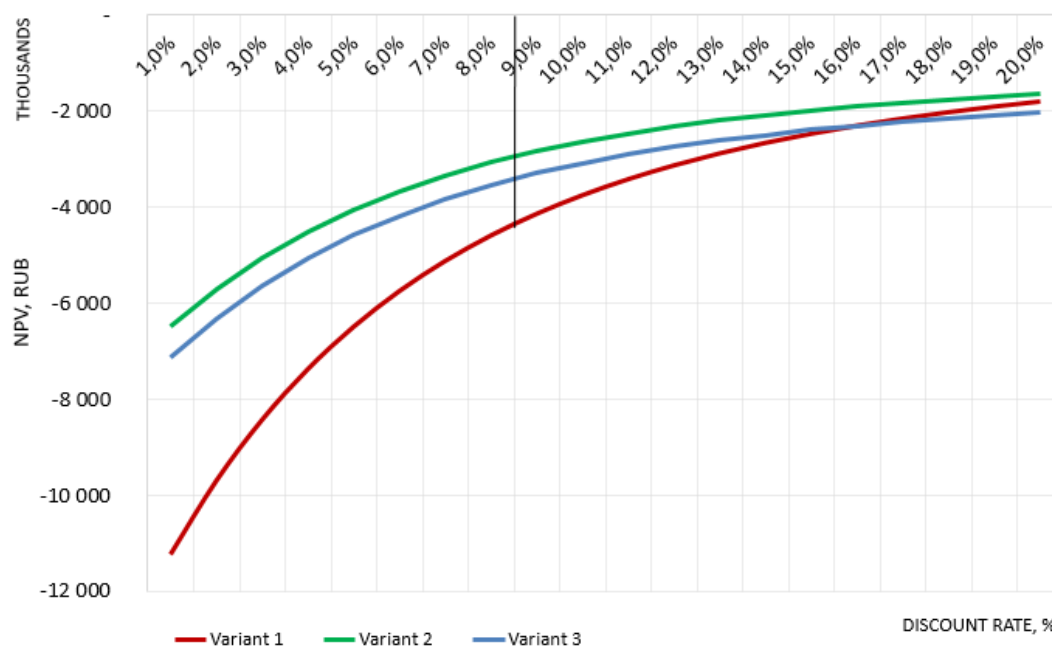


Figure 37 – NPV dependence on discount rate

2.4.3. Sensitivity on initial investment costs of the system

Total initial investment is a crucial factor for every variant which significantly influences the NPV performance. In this analysis, 0% corresponds to the current investment costs of the system, 50% (- 50%) means that the investment costs are increased or decreased by half. The presented NPV dependence on investment costs of the first variant is characterized by a weak influence in comparison with the other two variants. It can be explained that the major part of the NPV value contains the operating and maintenance costs of the generator, but the initial investment costs are low. As for variants based on PV systems, the situation is changed vice-versa since PV systems require high initial investments costs, but low maintenance and operating costs.

The analysis considers the future relatively low prices of the components of PV systems. As it was discussed earlier, a reduction of the cost of solar cells will lead to a decrease in the cost of PV panels, as well as in the cost of all PV system's components such as a controller, supporting structure. According to the extensive analysis of future investment costs conducted by "Fraunhofer-Institute for Solar Energy Systems", solar power will hold a leading position as the cheapest form of electricity. Taking into account their ambitious assumptions, the cost of PV will be decreased by almost 50% by the end of the year 2050 [32]. Therefore there is a high potential for future low investment costs for PV systems.

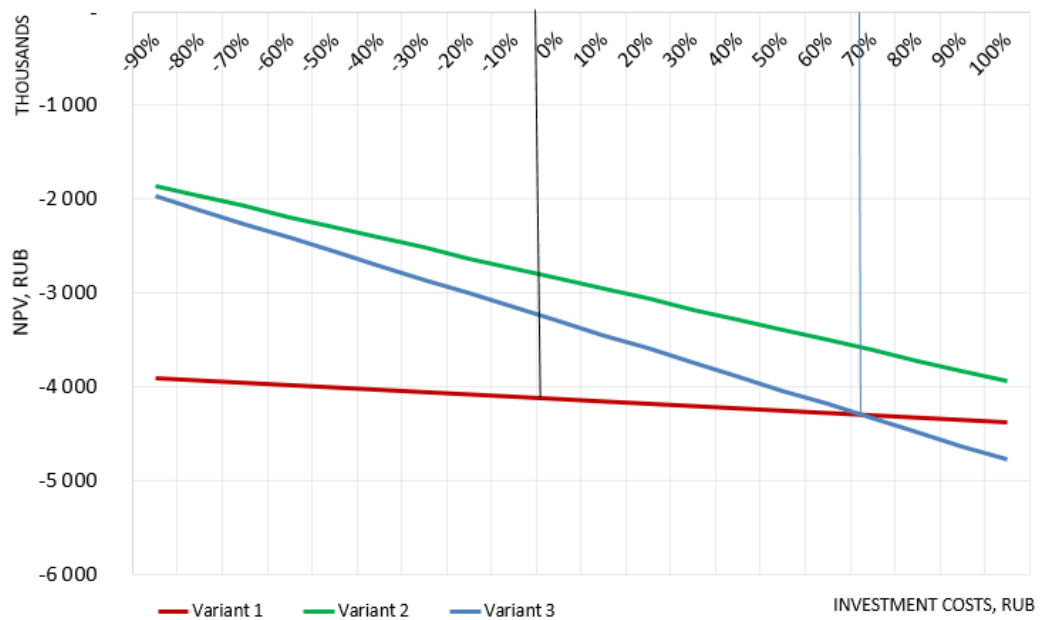


Figure 38 – NPV dependence on initial investment costs

If the investment costs of PV system with solar tracker is increased by 72%, the variant with generator set is becoming a more attractive decision, but still, the variant with the optimally tilted PV system has higher value of NPV. The NPV of PV system with the tracker is more sensitive to the investment costs in comparison with the other variants. Accordingly, the NPV sensitivity on the cost of solar tracker will be examined.

2.4.4. Sensitivity on cost of solar tracker

Referring to the discussion in the subchapter **Error! Reference source not found.**, the main factor which strongly influences the economic performance and the decision of PV with solar tracker is the current cost of solar tracker. Therefore, the analysis shows how much the solar tracker should cost today, in this particular case, in order to guarantee the viability of usage of solar trackers in PV systems. As **Error! Reference source not found.** indicates, the cost of solar tracker must be less or equals to 35 thou. RUB. It is about eight times lower than the original price. Surely, the development of such scenario is quite difficult to imagine. However, at the moment, the “Global Solar Tracker Market 2015 – 2019” report provides a comprehensive analysis of the global solar tracker market, identifies the economic drivers for tracking systems and forecasts the price. According to the report, the global market for solar tracking systems is expected to grow at a CAGR of 17.2% from 2016 to 2025. The majority of cost reduction will be impacted by the wider economics of the PV sector and will come from the minimization of electrical elements and lower structural elements within the composition of tracking systems. As the result, taking into account such a high annual growth rate and development of the PV sector, the cost reduction of solar trackers have a chance in the near future.



Figure 39 – NPV dependence on cost of solar tracker

In this case study, the cost of the solar tracker is taken from the Russian company “EDS Group”. However, there is a number of companies dealing with the manufacture of trackers. Therefore, the possible range of the cost of dual-axis solar tracker is analyzed and provided in the above sensitivity analysis. The possible range is based on the current prices of dual-axis solar trackers according to the following companies: “Rentechno” (Ukraine), “Array Technologies” (Spain), “Convert” (Italy), “Traxle” (Czech Republic), Soltec (USA), Nextracker (USA), Arctech Solar (China).

2.4.5. Sensitivity on number of panels

One of the important sensitivity analyses is the NPV dependence on a number of installed PV panels. The number of panels has a substantial influence the final decision. The analysis is conducted in order to determine the optimum number of panels from the economic point of view. In **Error! Reference source not found.**, the NPV dependence on the number of PV panels in the case of the optimally tilted PV system is presented.

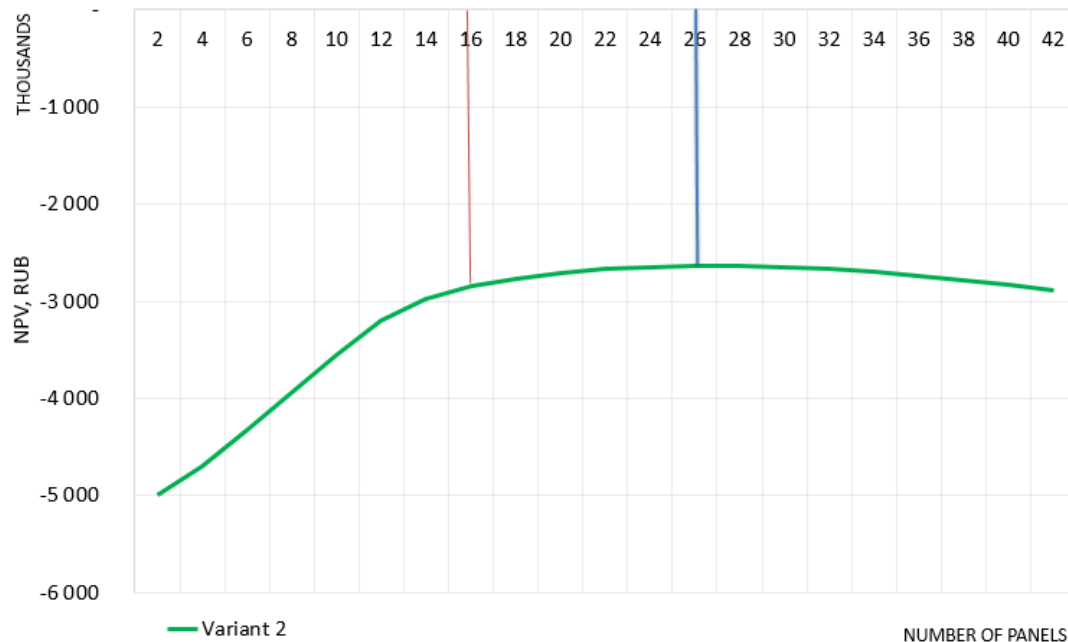


Figure 40 – NPV dependence on number of panels in optimally tilted PV system

According to the chapter of technical evaluation of the variants, the number of installed PV panels for optimally tilted PV system is 16 from the technical point of view. Based on the presented graph, it can be seen that from the 16th panel the influence of the NPV is becoming weaker to compare with the first part of graph (number of panels less than 16). But the NPV is slowly increasing with increase of installed number of PV panels after 16th panels. The dependence is explained by the relatively low performance of panels in November, February and the overall winter period. Therefore, the number of operating hours of the generator, consequently, the fuel consumption is slowly and gradually decreases step by step. Such increasing NPV behavior keeps going until the moment when the number of installed panels reaches 26. After that, the NPV is slowly decreasing. The reason of that is the increase of the investment costs: PV panels and its wires, a new controller since that the short-circuit current of additional PV panel is increasing as well as the value of open-circuit voltage. At the same time, the maintenance costs are increasing. From one side the fuel consumption and operating hours of generator are reducing, from another side, the investment costs are increasing. The NPV of 26th installed panels has the highest value, therefore, it can be concluded that the optimum number of PV panels is 26 from economic point of view. Since there are no space limitations on the territory of the object, such extension (scale of the system) of the PV system is acceptable. The additional factor in favor of extension PV system is development and modernization of the meteorological station (for instance, additional equipment).

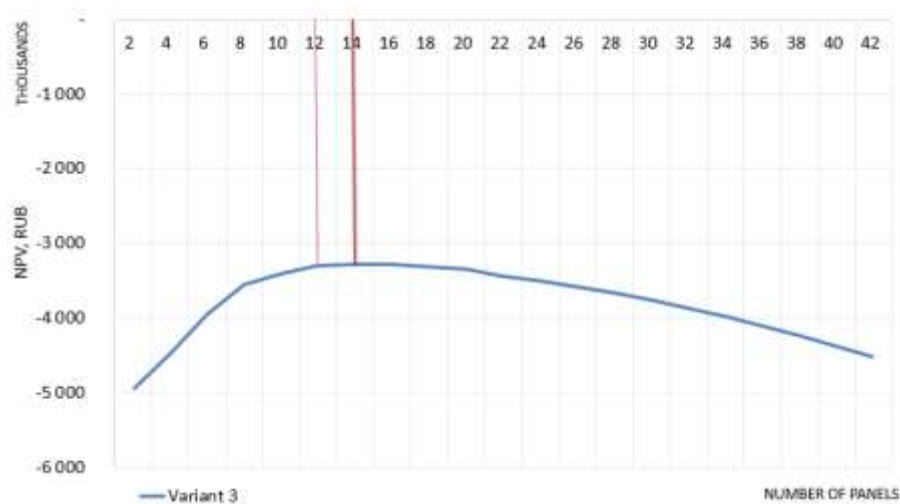


Figure 41 – NPV dependence on number of panels in PV system with solar tracker

The same scenario applies to the PV system with the solar tracker, but the only difference is a number of installed panels. Since the performance of one additional PV panel which tracks the Sun's position is relatively higher in comparison with fixed PV panel, there is a quite sharp change in the NPV behavior when the number of panels is increasing. The significant cost of the solar tracker, consequently, the significant total investments costs explains the extreme falling of the NPV value. Therefore, it can be seen from the dependence that the optimum number of PV panels in the system with the solar tracker is equal to 14. Based on the discussion provided above, the economic results for both new PV systems with optimum number of PV panels are presented in **Error! Reference source not found..**

Table 24 – New economic results

	Optimally tilted PV system	PV with tracker
NPV (old system), thou. RUB	- 2 839	- 3 298
Minimum price, RUB/kWh	25.55	29.68
NPV (extended system), thou. RUB	- 2 637	- 3 239
Minimum price, RUB/kWh	23.75	29.52

