

ОТЗЫВ
НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ
на магистерскую диссертацию

Абдуллаев Бауыржан Муратович

7M07113 – Электротехника и энергетика

На тему: Исследование эффективности солнечных электростанций большой мощности с трекерными и без трекерными системами в условиях Казахстана

Магистерская диссертация магистранта Абдуллаева Бауыржана посвящена исследованию эффективности трекерных и стационарных солнечных электростанций мощностью 50 МВт в условиях Казахстана. Работа носит актуальный и прикладной характер, соответствует задачам развития возобновляемой энергетики страны. В диссертации представлен подробный сравнительный анализ на основе моделирования в программной среде PVsyst с использованием реальных координат и параметров действующих объектов. Также приведены фактические данные по выработке электроэнергии, полученные из официальных источников, что усиливает достоверность результатов. Особый интерес представляют разделы, посвящённые оценке капитальных и эксплуатационных затрат, расчёту дисконтированного срока окупаемости, а также предложенные практические меры по оптимизации работы трекерных систем в сложных климатических условиях.

Учитывая объём и содержание проделанной работы, считаю, что магистерская диссертационная работа Абдуллаева Б.М. выполнена на актуальную тему, соответствует установленным требованиям к квалификационным работам данного уровня и заслуживает оценки «отлично» (90 %). Автор заслуживает присвоения академической степени магистра по образовательной программе 7M07113 – «Электроэнергетика и энергетика».

Научный руководитель
ассоц. профессор

 **Р. М. Утебаев**

«20» 06 2025 г.

РЕЦЕНЗИЯ

на магистерскую диссертацию
(наименование вида работы)

Абдуллаев Бауыржан Муратович
(Ф.И.О. обучающегося)

7M07113 – Электроэнергетика и энергетика
(шифр и наименование специальности)

На тему: Исследование эффективности солнечных электростанций большой мощности с трековыми и без трековыми системами в условиях Казахстана

Выполнено:

- а) графическая часть на 24 листах
б) пояснительная записка на _____ страницах

Диссертационная работа посвящена актуальной теме повышения эффективности солнечной генерации в условиях Казахстана путём сравнительного анализа трековых и стационарных систем. Автором выполнено моделирование на основе климатических данных пяти регионов и приведено обоснование дополнительных затрат и выгод при использовании систем слежения. Работа отличается высокой степенью проработанности, включает как теоретические выкладки, так и элементы практического анализа.

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

В ряде разделов следует уточнить и унифицировать терминологию (например, использование выражений «удельная выработка», «солнечная инсоляция»), а также обратить внимание на стилистическую согласованность и краткость формулировок в выводах.

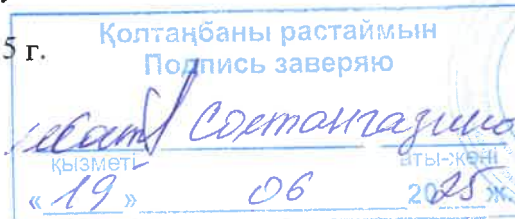
Оценка работы

В целом, магистерская диссертационная работа Абдуллаева Б.М. выполнена на актуальную тему и заслуживает оценки «отлично» (90%), а автор заслуживает присвоения степени магистра по специальности 7M07113 - «Электроэнергетика и энергетика».

Рецензент

АУЭС, канд. тех. наук, ассоц.профессор кафедры
«Электронная инженерия»
(должность, уч. степень, звание)

Юсупова С.А.
(подпись)
«19» 06 2025 г.



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Абдуллаев Бауыржан Муратович

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Исследование эффективности Солнечных электростанции большой мощности с трекерными и без трекерными системами в условиях Казахстана.

Научный руководитель: Руслан Утебаев

Коэффициент Подобия 1: 3.3

Коэффициент Подобия 2: 0.9

Микропробелы: 185

Знаки из здругих алфавитов: 13

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

Дата 23.06.2025г

Заведующий кафедрой Энергетики
Сарсебаев ЕА.


Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Абдуллаев Бауыржан Муратович

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Исследование эффективности Солнечных электростанции большой мощности с трекерными и без трекерными системами в условиях Казахстана.

Научный руководитель: Руслан Утебаев

Коэффициент Подобия 1: 3.3

Коэффициент Подобия 2: 0.9

Микропробелы: 185

Знаки из здругих алфавитов: 13

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

Дата 23.06.2025г.

Научный руководитель:
Утебаев Р.М.
проверяющий эксперт

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»
Институт

Институт Энергетики и машиностроения

Кафедра Энергетики

Абдуллаев Бауыржан Муратович

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Исследование эффективности солнечных электростанции большой мощности с трекерными
и без трекерными системами в условиях Казахстана»

7М07113-«Электротехника и энергетика»

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»
Институт

Институт Энергетики и машиностроения

УДК

На правах рукописи

Абдуллаев Бауыржан Муратович

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

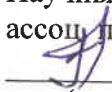
На соискание академической степени магистра

Название диссертации: «Исследование эффективности солнечных электростанции большой
мощности с трекерными и без трекерными системами в условиях Казахстана»

7М07113-«Электротехника и энергетика»

Научный руководитель

ассоц. профессор

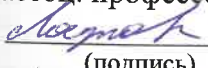
 Р.М. Утебаев
(подпись)

«20» 06 2025 г.

Рецензент

АУЭС, канд. тех. наук.,

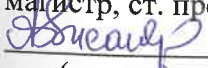
ассоц. профессор

 С.А. Юсупова
(подпись)

«19» 06 2025 г.

Норм контроль

магистр, ст. преподаватель

 А.О. Бердибеков
(подпись)

«19» 06 2025 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

НАО «КазНТУ им.К.И.Сатпаева»

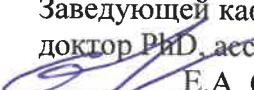
Институт энергетики

и машиностроения

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующей кафедрой,

доктор PhD, ассоц. профессор

 Е.А. Сарсенбаев

«20» 06 2025 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»
Институт

Институт Энергетики и машиностроения

Кафедра Энергетики

7М07113-«Электротехника и энергетика»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

доктор PhD, ассоц. профессор

Е. А. Сарсенбаев

«05» 12 2023 ж.

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту: Абдуллаеву Бауыржану Муратовичу

Тема: Исследование эффективности солнечных электростанций большой мощности с
трекерными и без трекерными системами в условиях Казахстана

Утверждена № 548-1 приказом ректора университета от "04" 12 2023 года

Срок сдачи законченной диссертации:

Перечень вопросов, подлежащих разработке в магистерской диссертации, или краткое
содержание диссертации:

- а) Анализ современных технологий и тенденций крупных солнечных электростанций с
трекерными и стационарными системами крепления модулей в мире и в Казахстане;
- б) Проблемы и их решения для повышения эффективности работы солнечных
электростанций в сложных погодных условиях;
- в) Моделирование солнечных электростанций с двумя типами конструкций (трекерными и
стационарными) на координатах действующих станций;
- г) Сравнительный анализ трекерных и стационарных систем на основе фактических данных
и результатов моделирования.

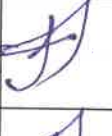
Рекомендуемая основная литература: Станфорд, Дж. М. (2016). Солнечные электрические
системы. — Москва: Энергия; Беннет, М. (2017). Трекерные системы для солнечных
электростанций. — Санкт-Петербург: Политехника; Kalogirou, H. (2014). Solar Energy
Engineering: Processes and Systems. — Oxford: Elsevier; Zubi, G., et al. (2019). The economic and
technical efficiency of solar tracking systems. — Renewable and Sustainable Energy Reviews, 105,
227-236; ATB NREL. (2019). Annual Technology Baseline Reports. — Golden, CO: NREL.

ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Современное состояние и технологии солнечных электростанций	12.04.2024	Выполнено
Практические решения для оптимизации работы солнечной фотоэлектрической станции в сложных погодных условиях на основе экспериментальных методов	21.12.2024	Выполнено
Климатические условия Казахстана для проектирования солнечных электростанций	10.04.2025	Выполнено
Моделирование исследуемых СЭС в программном обеспечении PVsyst	20.05.2025	Выполнено

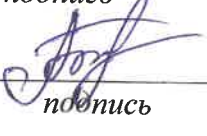
Подписи

консультантов и норм контролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Современное состояние и технологии солнечных электростанций	Р.М. Утебаев, ассоц. профессор	12.04.2024	
Практические решения для оптимизации работы солнечной фотоэлектрической станции в сложных погодных условиях на основе экспериментальных методов	Р.М. Утебаев, ассоц. профессор	21.12.2024	
Климатические условия Казахстана для проектирования солнечных электростанций	Р.М. Утебаев, ассоц. профессор	10.04.2025	
Моделирование исследуемых СЭС в программном обеспечении PVsyst	Р.М. Утебаев, ассоц. профессор	20.05.2025	
Норм контролер	А.О.Бердибеков ст. преподаватель	19.06.2025	

Научный руководитель  / Р.М. Утебаев /

подпись

Задание принял к исполнению обучающийся  / Б.М.Абдуллаев /

подпись

Дата

« 20 » 12 2023 г.

АНДАТПА

Бұл диссертациялық жұмыс Қазақстанның климаттық, географиялық жағдайына байланысты ірі қуатты күн электр станцияларының трекерлі және стационарлы құрылымының тиімділігінің салыстырмалы талдауына арналған. Зерттеу барысында еліміздің қуаты 50 МВт болатын күн электр станцияларының нақты координаттарының негізінде PVsyst бағдарламасы арқылы зерттелетін екі түрлі құрылым үшін моделдеу жүргізілді және сол станциялардың нақты өндіріс мәндерін қолдана отырып салыстырмалы анализ жүргізілді. Зерттеуде энергетикалық, техникалық және экономикалық аспектілер қарастырылып, климаттық факторлар мен маусымдық шығындардың әсері есепке алынып, күрделі ауа райы жағдайында оңтайландыру әдістері қолданылды. Салыстырмалы талдау экономикалық тиімділік көрсеткіштерін бағалауға мүмкіндік берді. Модельдеу нәтижелері және нақты мәліметтер трекерлік жүйелердің жылдық энергия өндіруін едәуір арттыратынын көрсетті. Сонымен қатар, моделдеу арқылы зерттелген өңірлердегі күн электр станцияларындағы болуы мүмкін болған шығындар мөлшері анықталды. Нәтижелер Қазақстандағы күн электр станцияларын жобалау және пайдалану тиімділігін жақсартуға мүмкіндік береді.

АННОТАЦИЯ

Данная диссертационная работа посвящена сравнительному анализу эффективности трекерных и стационарных конструкций крупных солнечных электростанций в контексте климатических и географических условий Казахстана. В ходе исследования с использованием программного обеспечения PVsyst было выполнено моделирование двух типов конструкций на основе реальных координат солнечных электростанций мощностью 50 МВт, расположенных на территории страны. Также проведён сравнительный анализ с использованием фактических данных генерации этих станций. В работе рассмотрены энергетические, технические и экономические аспекты, учтено влияние климатических факторов и сезонных потерь, а также применены методы оптимизации в сложных погодных условиях. Сравнительный анализ позволил оценить экономическую эффективность различных конструкций. Результаты моделирования и фактические данные показали, что трекерные системы значительно увеличивают годовую выработку энергии. Кроме того, с помощью моделирования определены возможные потери, характерные для конкретных регионов. Полученные результаты позволяют повысить эффективность проектирования и эксплуатации солнечных электростанций в Казахстане.

ABSTRACT

This dissertation is devoted to a comparative analysis of the efficiency of tracker-based and fixed-tilt configurations of large-scale solar power plants, considering the climatic and geographical conditions of Kazakhstan. The study employed PVsyst software to model both types of systems using the actual coordinates of 50 MW solar power plants located across the country. A comparative analysis was also conducted based on real operational data from these stations. The research examined energy, technical, and economic aspects, taking into account the influence of climatic factors and seasonal losses, and applied optimization methods under challenging weather conditions. The comparative evaluation allowed for assessing the economic performance of the systems. Modeling results and real-world data demonstrated that tracker systems significantly increase annual energy output. Additionally, the simulation helped identify potential losses specific to each region. The findings contribute to improving the design and operational efficiency of solar power plants in Kazakhstan.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Современное состояние и технологии солнечных электростанций	10
1.1 Развития солнечных электростанции в мире и в Казахстане	10
1.2 Применение трекерных систем в солнечных электростанциях	13
2 Практические решения для оптимизации работы солнечной фотоэлектрической станции в сложных погодных условиях на основе экспериментальных методов	21
2.1 Технические характеристики СЭС ЮКСЭС 50	21
2.2 Методы защиты от скачков мощности в условиях переменной облачности	24
2.3 Повышение эффективности солнечных электростанций с трекерной системой. Подходы к улучшению работы во время снегопада	28
3 Климатические условия Казахстана для проектирования солнечных электростанций	32
3.1 Климатические условия Алматинской области	34
3.2 Климатические условия Туркестанской области	35
3.3 Климатические условия Жамбылской области	37
3.4 Климатические условия Кызылординской области	38
3.5 Климатические условия Карагандинской области	39
4 Моделирование исследуемых СЭС в программном обеспечении PVsyst	41
4.1 Моделирование СЭС-1 с трекерной системой в Туркестанской области в среде PVsyst	43
4.2 Моделирование СЭС-1 со стационарной системой в Туркестанской области в программной среде PVsyst	51
4.3 Сравнительный анализ результатов моделирования СЭС в исследуемых регионах с фактическими данными реальных электростанций	55
4.4 Экономическая оценка трекерных и стационарных систем	62
Заключение	66
Список использованной литературы	68

ВВЕДЕНИЕ

В условиях неизбежной нехватки ископаемых источников топлива в будущем возобновляемые виды энергии стали предметом интереса исследователей, технических специалистов, инвесторов и лиц, принимающих решения, по всему миру. Новые виды энергии, которые привлекают внимание, включают гидроэлектростанцию, биоэнергию, солнечную, ветровую и геотермальную энергию, энергию приливов и энергию волн. Из-за их возобновляемости они рассматриваются как выгодная замена ископаемым источникам топлива. Солнечная фотоэлектрическая энергия (PV) относится к числу наиболее доступных и применимых видов возобновляемой энергии. В настоящее время эта технология получила более широкое распространение для использования в жилых помещениях благодаря исследованиям и разработкам, направленным на повышение производительности солнечных элементов и снижение их стоимости. По данным Международного энергетического агентства (МЭА), с начала 2000-х годов мировые фотоэлектрические мощности росли в среднем на 49% в год. Ожидается, что в перспективе солнечная фотоэлектрическая энергия станет одним из ведущих источников энергоснабжения. Тем не менее, несмотря на её многочисленные преимущества, в настоящее время она ещё не в состоянии полностью заменить традиционные источники энергии на мировом энергетическом рынке. Особую сложность представляет задача повышения выработки электроэнергии фотоэлектрическими системами в регионах с ограниченным уровнем солнечной радиации. Для преодоления этих ограничений требуется дальнейшее развитие высокоэффективных технологий производства фотоэлектрических материалов. Вместе с тем, улучшение конструктивных решений модулей и систем в целом рассматривается как действенный путь к повышению эффективности солнечной генерации, что способствует формированию её статуса как надёжного источника энергии.

На данный момент в Казахстане реализовано и находится в стадии разработки множество проектов по строительству СЭС различной мощности. Общая установленная мощность солнечных электростанций в стране продолжает расти, что подтверждает амбиции Казахстана стать лидером в области возобновляемых источников энергии в Центральной Азии. Прогнозы говорят о дальнейшем ускорении темпов развития сектора, особенно в свете глобальных тенденций декарбонизации и увеличения эффективности солнечных технологий. С быстрым увеличением числа крупномасштабных солнечных электростанций в Казахстане возрастает потребность в глубоком анализе технических решений, способных повысить их выработку и экономическую отдачу. В частности, трекерные системы, автоматически ориентирующие солнечные панели на солнце, обещают значительный прирост генерации по сравнению со стационарными установками. Однако в условиях континентального климата и специфики солнечной радиации Казахстана их реальная эффективность ещё недостаточно исследована. Одним из ключевых

подходов к повышению эффективности фотоэлектрических систем является увеличение продолжительности их нахождения под прямым солнечным излучением. Системы слежения за солнечным движением позволяют реализовать данный принцип за счёт динамического регулирования угла наклона модулей, обеспечивая их оптимальную ориентацию по отношению к солнечным лучам в течение всего светового дня.

Актуальность работы обусловлена тем, что в последние годы в Казахстане заявлены и вводятся в эксплуатацию новые объекты солнечной генерации общей мощностью сотни мегаватт и более. Оптимизация конструкции таких станций напрямую влияет на окупаемость проектов и устойчивость энергосистемы страны. Поэтому сравнительный анализ эффективности солнечных электростанций большой мощности с трекерной и стационарной системами в условиях Казахстана позволит дать практические рекомендации инвесторам и инженерам при выборе наиболее выгодной конфигурации.

Методы исследования заключаются в анализе фактических данных энерговыработки действующих солнечных электростанций мощностью 50 МВт с трекерной и фиксированной системами в Туркестанской, Жамбылской, Алматинской, Карагандинской и Кызылординской областях, а также в моделировании этих станций в программе PVsyst.

Научная новизна исследования заключается в комплексном подходе к моделированию и анализу работы крупных солнечных электростанций, проведённом с учётом климатических особенностей Казахстана и фактических эксплуатационных данных. Впервые выполнена интегральная оценка производительности систем двух типов крепления (трекерных и стационарных) в условиях местного климата. Разработаны и верифицированы адаптивные модели энергетической отдачи трекерных установок с учётом сезонных колебаний солнечной инсоляции и погодных параметров. На основе модельных расчётов обоснованы рекомендации по оптимизации конструкции и планирования СЭС. Новизна работы также заключается в совмещении технического моделирования с анализом фактических выходных данных действующих электростанций и экономических оценок эффективности

Целью этой диссертации является исследование эффективности солнечных электростанций большой мощности с системой слежения за солнцем в условиях Казахстана. От этой диссертации также ожидается количественное измерение того, насколько хорошо работает система слежения по сравнению с системой со стационарным способом монтажа.

В соответствии с целью исследования поставлены следующие задачи:

- 1) Изучение современных технологий и тенденций развития крупных солнечных электростанций с трекерными и стационарными системами крепления модулей, а также их перспектив реализации в мировом и Казахстанском контексте;

2) Выявление основных проблем и разработка способов повышения эффективности работы солнечных электростанций с учётом характерных для региона сложных климатических факторов;

3) Разработка моделей и проведение моделирования работы солнечных электростанций с двумя типами конструкций (трекерными и стационарными) на основе географических координат и метеорологических данных действующих станций;

4) Проведение сравнительного анализа эффективности трекерных и стационарных систем на основе фактических эксплуатационных данных и результатов моделирования.

Практическая ценность работы заключается в возможности использования её результатов при проектировании, эксплуатации и инвестиционном анализе крупных солнечных электростанций в Казахстане. Разработанные модели и полученные аналитические результаты позволяют инженерам и инвесторам обоснованно выбирать между трекерными и стационарными системами крепления в зависимости от климатических условий конкретного региона. Предложенные рекомендации помогут повысить надёжность работы станций, их энергетическую отдачу и экономическую эффективность, а также снизить неопределённости при планировании и реализации проектов СЭС. Кроме того, результаты исследования могут быть использованы при формировании нормативных документов и стандартов в области возобновляемой энергетики.

Апробация работы является подтверждением научной и практической значимости полученных результатов. Основные положения исследования были представлены и обсуждены на научных конференциях, а также рекомендованы к публикации в профильных рецензируемых изданиях. Разработанные проектные рекомендации обладают прикладной ценностью, пригодны для реализации на региональном уровне и могут быть адаптированы под конкретные климатические и эксплуатационные условия.

1 Современное состояние и технологии солнечных электростанций

1.1 Развития солнечных электростанций в мире и в Казахстане

В эпоху, когда возобновляемые источники энергии занимают центральное место в глобальном стремлении к устойчивому развитию, солнечные электростанции выступают в качестве маяков надежды и прогресса. Благодаря значительным мощностям и внедрению передовых технологий современные солнечные парки переопределяют подходы к производству электроэнергии, внося ощутимый вклад в сокращение выбросов парниковых газов и борьбу с изменением климата. В условиях, когда человечество сталкивается с необходимостью перехода от ископаемого топлива к экологически чистым альтернативам, солнечные электростанции играют ключевую роль в создании более устойчивого и экологичного энергетического будущего. По мере роста спроса на чистую энергию, такие масштабные проекты становятся неотъемлемой частью глобального энергетического перехода, демонстрируя значительный успех в массовом использовании неисчерпаемого солнечного ресурса и способствуя достижению климатических целей мирового сообщества [1].

Сегодня во всём мире активно развивается использование солнечной энергии, совершенствуются технологии производства фотоэлектрических модулей, снижается их стоимость и существенно увеличиваются объемы вводимых в эксплуатацию мощностей. В 2024 году глобальная установленная мощность фотоэлектрических (PV) станций существенно выросла, достигнув приблизительно 2,2–2,3 ТВт к концу года. За этот год было введено в эксплуатацию рекордное количество новых мощностей – порядка 550–600 ГВт (по оценкам IEA PVPS — программа Международного энергетического агентства по фотоэлектрическим энергетическим системам), что на ≈32% превосходит уровень 2023 года[7]. В результате доля солнечной энергетики в общем приросте возобновляемых источников составила более 75%. Фотоэлектрические станции превзошли все остальные возобновляемые технологии по темпам роста: например, IEA отмечает, что только в 2024 г. установки PV дали более половины от общего прироста выработки возобновляемой энергии. Ключевым драйвером роста остаётся Азия, прежде всего Китай. По данным IEA PVPS, в 2024 г. в Китае было установлено как минимум 309 ГВт новых PV-мощностей (по официальной статистике) и до 357 ГВт с учётом дополнительных оценок. Вторым крупнейшим рынком стал Евросоюз (62,6 ГВт новых установок). Среди стран-лидеров – США (47,1 ГВт новых в 2024), Индия (31,9 ГВт; более чем в 2 раза больше, чем в 2023), а также страны, где резко вырос импорт недорогих панелей (Пакистан добавил ≈17 ГВт). В Европе быстро растут Германия и Бразилия (16,7 и 14,3 ГВт соответственно). Рынки Испании (7,5 ГВт) и Италии (6,8 ГВт) стабильно входят в десятку крупнейших по приросту[6].

В результате активного расширения PV-сектора во многих странах выросла доля солнечной генерации в общем энергопотреблении. По оценке IEA PVPS, в ряде государств-фронтираннеров производство электроэнергии от PV уже превышает 10% потребления (в 2024 г. такое достижение превысили 25 стран). В мировом масштабе примерно 5–6% электроэнергии производится с помощью PV-технологий (данные за 2023 год – порядка 5,4% мирового энергопотребления). Среди прочих достижений следует отметить продолжение тенденции к удешевлению фотомодулей: за 2024 г. их цены упали ещё на 15–20%, стимулируя спрос. Кроме того, PV-системы по-прежнему занимают львиную долю новых объёмов возобновляемой генерации (например, IEA PVPS констатирует, что в 2024 г. PV обеспечили свыше 75% добавленных возобновляемых мощностей)[7].

Прогнозы развития мировой PV-индустрии указывают на дальнейший рост, хотя с некоторыми колебаниями. По оценке BloombergNEF, ежегодные установки PV вырастут с 600–700 ГВт в 2024 г. до примерно 698 ГВт в 2025 г. и 753 ГВт в 2026 г. Это позволило бы выйти на кумулятивную мощность около 2,9 ТВт к концу 2025 г. и $\approx 3,7$ ТВт к концу 2026 г. (от базовых $\sim 2,2$ ТВт на начало 2025 г.). В своём прогнозе SolarPower Europe отмечает, что к 2030 году темпы могут достигнуть ≈ 1 ТВт/год, хотя отдельные факторы, например, изменение регуляторных правил в Китае, способны вызвать временное замедление роста около 2026 года. IEA подчёркивает необходимость выхода на уровни установок порядка 900 ГВт/год уже к середине десятилетия (сейчас прогнозы пока ниже этого), чтобы выполнить сценарии ограничения потепления климата. В целом эксперты ожидают устойчивого расширения PV-сектора благодаря продолжающемуся снижению стоимости технологий и расширению программ поддержки, особенно в развивающихся странах[7]. Как показано в Таблице 1, суммарные мощности солнечных электростанций (СЭС) по странам мощностью выше 1 МВт по состоянию на февраль 2025 года, опубликованные на международном портале Global Energy Monitor[22], приведены ниже.

Таблица 1 – Суммарные мощности СЭС по странам мощностью выше 1 МВт по состоянию на февраль 2025 года

Страна	Р _{уст} , ГВт	Страна	Р _{уст} , ГВт	Страна	Р _{уст} , ГВт
Китай	447,508	Франция	11,818	Южная Африка	3,992
США	121,311	Австралия	11,626	Нидерланды	3,916
Индия	72,3	Чили	9,982	Канада	3,745
Япония	31,095	Великобритания	9,031	Сауд. Аравия	3,305
Испания	28,014	Южная Корея	7,45	Египет	3,125
Германия	26,283	ОАЭ	6,353	Россия	2,213
Бразилия	20,165	Украина	5,259	Узбекистан	1,39
Вьетнам	12,902	Италия	4,447	Чехия	1,294
Мексика	12,787	Турция	4,077	Казахстан	1,111

В настоящее время сектор возобновляемых источников энергии (ВИЭ) представляет собой одно из наиболее динамично развивающихся направлений в сфере электроэнергетики Республики Казахстан. Объёмы выработки электроэнергии за счёт ВИЭ демонстрируют устойчивый рост, что обусловлено реализацией комплекса государственных мер и программ, направленных на поддержку и стимулирование развития возобновляемой энергетики в стране. Следуя международным тенденциям низко углеродного развития, в 2013 году принята Концепция перехода к «зеленой экономике», утвердившая цель достичь 50% доли альтернативных и возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергобалансе к 2050 году, а также поэтапные ориентиры по доле ВИЭ в производстве электроэнергии: 3% к 2020, 6% к 2025, 10% к 2030 году, что закреплено в действующем Стратегическом плане развития Республики Казахстан. По итогам 2024 года объем выработки электрической энергии составил 117,9 млрд. кВт·ч. Выработка ВИЭ – 7,58 млрд. кВт·ч, доля ВИЭ составила 6,4% от общей генерации. В настоящее время в Республике действует 148 объектов по использованию ВИЭ, установленной мощностью 2903,7 МВт. В том числе суммарная мощность 46 объектов солнечных электростанций мощностью – 1222,61 МВт, из них более 25% с системой солнце слежения [11].

В Казахстане действуют 130 объектов возобновляемых источников энергии мощностью 2715,8 МВт. Из них:

- 46 объектов ветровых электростанций мощностью – 1246,6 МВт;
- 44 объекта солнечных электростанций мощностью – 1197,83 МВт;
- 37 объектов гидроэлектростанций мощностью – 269,605 МВт;
- 3 объекта биоэлектростанций мощностью – 1,77 МВт.

Таблица 2 – Самые крупные СЭС Казахстана

Название СЭС	Область	Уст. мощность (МВт)	Тип конструкции
СЭС Сарань	Карагандинская	100	Стационарная
СЭС Нура	Акмолинская	100	Стационарная
СЭС ШУ-100	Жамбылская	100	Трекерная
СЭС Бурное	Жамбылская	100	Стационарная
СЭС Нургиса	Алматинская	100	Стационарная
СЭС ЮКСЭС 50	Туркестанская	50	Трекерная
СЭС Кентау	Туркестанская	50	Трекерная
СЭС Каскелен	Алматинская	50	Стационарная
СЭС Байконур	Кызылординская	50	Стационарная
СЭС Айша	Жамбылская	50	Трекерная
СЭС Шауельдер	Туркестанская	50	Трекерная
СЭС Шоктас	Туркестанская	50	Трекерная
СЭС Акадыр	Карагандинская	50	Стационарная
СЭС Балхаш	Карагандинская	50	Стационарная

1.2 Применение трекерных систем в солнечных электростанциях

Изменение климатических условий и стремительно растущий мировой спрос на электроэнергию обуславливают необходимость масштабного внедрения возобновляемых источников энергии на глобальном уровне. По состоянию на начало 2025 года суммарная установленная мощность фотоэлектрических систем (PV) в мире демонстрирует устойчивую тенденцию к росту: с 125 ГВт в 2020 году показатель увеличился до 270 ГВт в 2023 году и превысил 925 ГВт к 2025 году [6]. Расширение использования солнечной энергетики может быть достигнуто за счёт различных мер, включая государственные субсидии, внедрение систем мониторинга, а также применение технологий слежения за движением солнца — так называемых трекерных систем. Основной задачей таких систем является увеличение выработки электроэнергии, что, согласно имеющимся исследованиям, позволяет повысить энергетическую отдачу на 22–56 % по сравнению с традиционными стационарными установками [8].

Солнечная энергия представляет собой неисчерпаемый природный ресурс, играющий ключевую роль в устойчивом энергетическом будущем. Вместе с тем, плотность солнечного излучения варьируется в зависимости от географического положения и атмосферных условий, что приводит к различиям в эффективности использования солнечных установок в разных регионах. Количество электроэнергии, генерируемой фотоэлектрической системой, определяется в основном уровнем солнечной радиации, достигающей поверхности модулей, а также зависит от свойств применяемых материалов, температуры окружающей среды и характеристик инверторного оборудования. Несмотря на невозможность прямого воздействия на интенсивность солнечного излучения, обусловленного климатом и географией, ориентация модулей может быть скорректирована таким образом, чтобы солнечные лучи падали перпендикулярно их поверхности, что способствует увеличению генерации электрической энергии.

Системы солнечной энергетики или фотоэлектрические системы, от компактных и простых, как в карманных калькуляторах, до сложных и мощных, как в источниках питания космических станций, — всё это стало возможным благодаря явлению, называемому фотоэлектрическим эффектом, преобразованию солнечной энергии в электричество постоянного тока в определённых типах полупроводников. Полное понимание процесса требует понимания различных физических концепций, таких как фотоны и солнечное излучение, полупроводниковая структура, преобразование между солнечным излучением, химической энергией и электрической энергией. Современные фотоэлектрические технологии базируются на достижениях в области материаловедения, оптоэлектроники и нанотехнологий. Для повышения эффективности солнечных модулей проводятся исследования по минимизации потерь при преобразовании и повышению чувствительности полупроводников. Кроме того, большое значение имеет разработка систем

слежения за солнцем, способствующих увеличению производительности установок за счёт оптимизации угла падения солнечных лучей. Для обеспечения максимального поглощения солнечной энергии фотоэлектрические модули должны как можно дольше находиться в оптимальной ориентации по отношению к направлению прямого солнечного излучения [29]. Количественно данная зависимость описывается через угол падения солнечных лучей на поверхность панели. При прочих равных условиях эффективная площадь, воспринимающая прямое излучение, пропорциональна значению $\cos(i)$, где i — угол между нормалью к поверхности модуля и направлением солнечных лучей. Таким образом, мощность P , собираемая фотоэлектрической системой, может быть рассчитана на основе следующего выражения [8]:

$$P_{\max} = P \cdot \cos(i). \quad (1)$$

где $P_{\max}$ — максимальная мощность, получаемая при правильном выравнении солнечной панели;

i — угол между нормалью к поверхности модуля и направлением солнечного излучения.

С помощью уравнения (1) можно рассчитать потерю мощности A :

$$A = \frac{P_{\max} - P_{\max} \cos(i)}{P_{\max}} = 1 - \cos(i) \quad (2)$$

уравнение (2) показывает, что чем больше смещен угол, тем больше теряется солнечная энергия. Эта связь показана на рисунке 1.

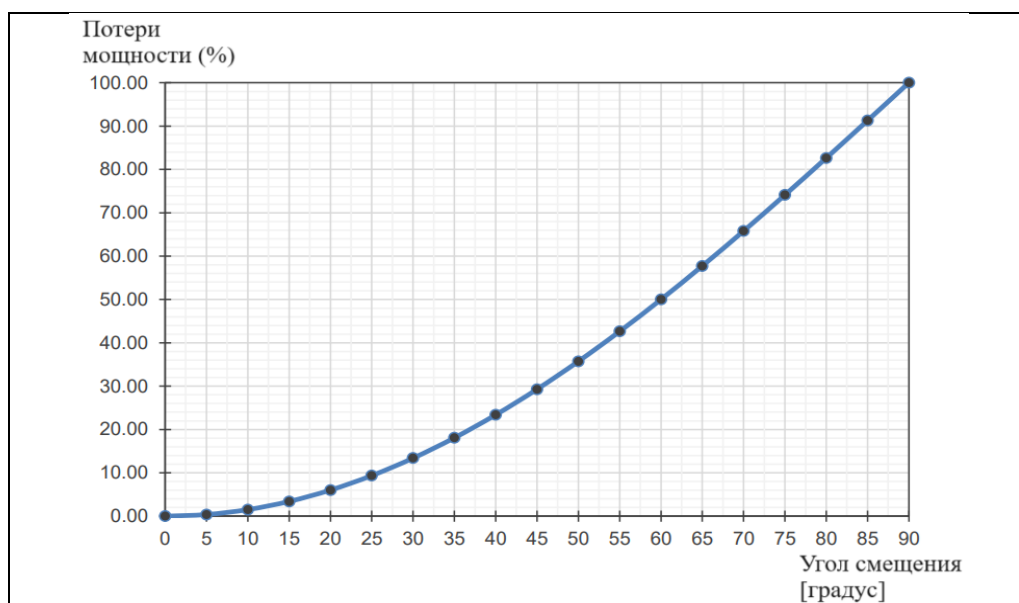


Рисунок 1 – Зависимость отклонения прямых лучей солнца от положения солнечных панелей

График, представленный на рисунке 1, иллюстрирует влияние угла отклонения панели от направления солнечного излучения на величину выходной мощности фотоэлектрических модулей. Из анализа графика видно, что отклонение панели на 30° от оптимального положения приводит к снижению выходной мощности приблизительно на 15 %. При дальнейшем увеличении угла смещения снижение мощности происходит ещё более интенсивно. На основе расчётов, выполненных с использованием данных о солнечном излучении, доступных в онлайн-базах, возможно оценить выработку электроэнергии стационарной фотоэлектрической установкой в заданной географической точке. В качестве примера рассмотрим условия для г. Туркестан на 20 июня 2023 года: восход солнца зафиксирован в 05:20, заход — в 21:20, а солнечный полдень приходится на 13:20. Опираясь на эти временные ориентиры и предполагая ясную погоду в течение всего дня, можно оценить изменение угла падения прямых солнечных лучей в течение светового дня и, используя уравнение (1), рассчитать соответствующие значения выходной мощности. Эти данные позволяют построить график, отображающий относительное изменение мощности по сравнению с её максимальным значением, как представлено на рисунке 2.

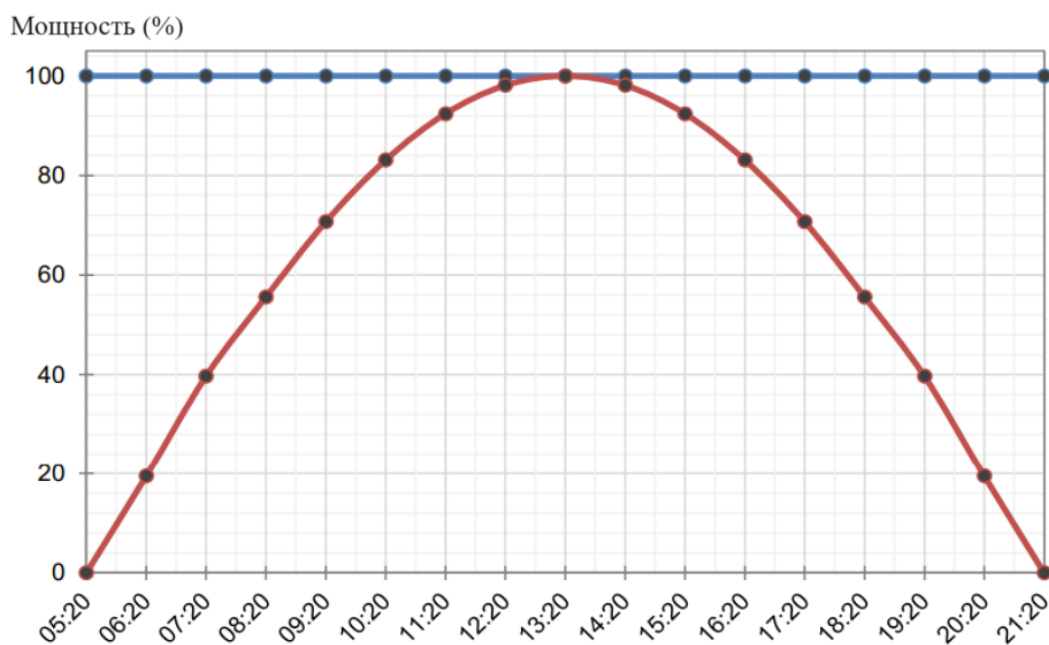


Рисунок 2 – График дневной выработки электроэнергии на электростанциях со стационарными панелями

Анализ графика (рисунок 2) показывает, что уровень выходной мощности превышает 85 % лишь в интервале между 11:00 и 16:00, то есть в течение приблизительно 5 часов. Это свидетельствует о том, что фотоэлектрические модули с фиксированным углом установки эффективно работают лишь ограниченное время в течение дня. В условиях типичного

летнего дня в г. Туркестан, когда продолжительность солнечного освещения превышает 10 часов, подобный режим функционирования приводит к значительному недоиспользованию доступного солнечного ресурса в утренние и вечерние часы. Такое ограничение непосредственно снижает суммарную дневную генерацию и, соответственно, удельную выработку электроэнергии с установленной мощности. Следует отметить, что приведённый график основан на приближённых расчётах и не учитывает всех факторов, влияющих на производительность системы. Тем не менее, даже в идеальных погодных условиях становится очевидно, что стационарная установка фотоэлектрических панелей не обеспечивает оптимального уровня энергоотдачи. На практике эффективность дополнительно снижается под воздействием таких факторов, как облачность, сезонное изменение высоты солнца над горизонтом и ограниченная продолжительность светового дня. Несмотря на конструктивную простоту и высокую надёжность, стационарное крепление фотоэлектрических модулей ограничено в своих возможностях по максимальному использованию солнечного излучения. Это делает его менее подходящим решением для проектов с высокой установленной мощностью или задач, предъявляющих повышенные требования к энергоэффективности. В связи с этим необходимо рассматривать более технологически продвинутые методы установки, в частности трекерные системы, способные значительно повысить уровень солнечного улавливания. В последующих разделах рассматриваются современные решения систем слежения, направленные на увеличение энергоотдачи фотоэлектрических установок.

Использование трекерной системы позволяет устранить этот недостаток за счёт более равномерного распределения выработки в течение дня. Благодаря этому достигается более полное использование солнечной инсоляции, особенно в периоды низкого угла падения. Это, в свою очередь, способствует увеличению общей годовой генерации и улучшению экономических показателей проекта[3]. На рисунке 3 представлен фактический график суточной генерации солнечной электростанции с трекерной системой, демонстрирующий более равномерное распределение мощности в течение светового дня.

В подтверждение этому на рисунке 3 представлена реальная выработка электроэнергии СЭС ЮКСЭС 50 с трекерной системой за ясный летний день — 16 июля 2021 года. Видно, что благодаря постоянному отслеживанию положения солнца панель сохраняет высокую производительность в течение более длительного периода времени. График имеет характерную «платообразную» форму, что указывает на устойчивую выработку энергии в течение всего светового дня, в отличие от "колоколообразного" графика со стационарными панелями, где пик мощности наблюдается лишь вблизи полудня. Это демонстрирует явные преимущества трекерных систем при применении в реальных условиях, особенно для солнечных электростанций средней и высокой мощности.

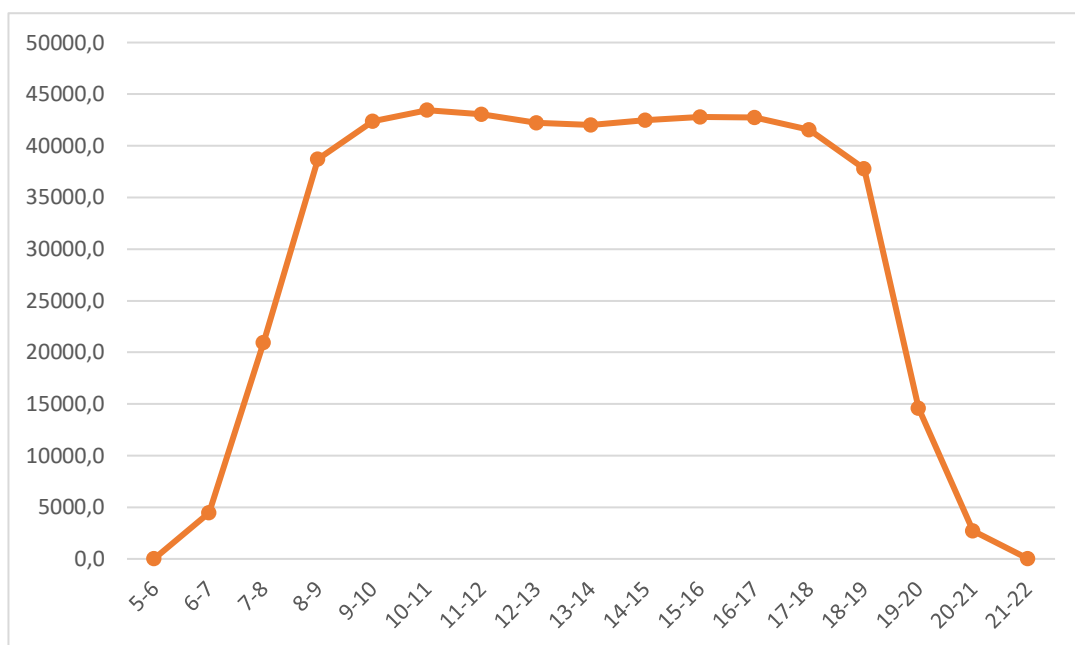


Рисунок 3 – Дневной график выработки электроэнергии СЭС ЮКСЭС 50 с трекерной системой в ясный день 16 июля 2021 года

Солнечная энергия - богатый и чистый возобновляемый источник энергии. Поскольку производство солнечной фотоэлектрической энергии продолжает расти, солнечные компании, разработчики и инвесторы больше, чем когда-либо, полагаются на солнечные фотоэлектрические трекеры для выработки электроэнергии и максимизации рентабельности солнечных проектов в условиях высоких затрат [1].

Солнечный трекер представляет собой устройство, предназначенное для автоматического позиционирования фотоэлектрических модулей под оптимальным углом к направлению солнечного излучения, что позволяет максимизировать его поглощение. При ориентации панели перпендикулярно солнечным лучам наблюдается снижение отражения света и увеличение доли поглощаемой энергии, что способствует росту энергетической эффективности системы. В отличие от большинства компонентов, обеспечивающих статический баланс в составе фотоэлектрической установки, трекер выполняет активную функцию: он непрерывно корректирует положение модулей в течение светового дня, обеспечивая их постоянную ориентацию по направлению к солнцу. Это позволяет существенно повысить суммарную выработку электроэнергии за счёт более эффективного использования доступного солнечного ресурса.

Современные крупномасштабные фотоэлектрические станции всё чаще оснащаются трекер-системами, что позволяет оптимизировать угол наклона модулей в зависимости от положения солнца на протяжении дня и сезона. Согласно данным IEA PVPS, в США в 2022 году 94 % вновь введённых утилитарных PV-мощностей использовали одноосные трекеры, вследствие

чего к 2030 г. мировой уровень использования трекеров ожидается на уровне 50 % всех новых утилитарных PV-установок[23].

Для позиционирования солнечных панелей с целью максимального улавливания солнечного излучения часто применяется шаговый двигатель, представляющий собой разновидность двигателя постоянного тока. Благодаря своей энергоэффективности и высокой точности позиционирования, шаговый двигатель широко используется в системах автоматического слежения за солнцем, позволяя эффективно адаптировать ориентацию модулей к изменяющемуся положению солнечного диска. В дополнение к этому, шаговые двигатели являются экономически более доступными по сравнению с серводвигателями, что делает их предпочтительным решением для недорогих трекерных систем. Согласно расчётам, использование технологии слежения за солнцем позволяет увеличить выходную мощность фотоэлектрической системы приблизительно на 30–40 %. Вместе с тем, системы трекинга, основанные на компьютерных алгоритмах, требуют более сложного обслуживания и характеризуются более высокой стоимостью по сравнению с традиционными стационарными установками.

Солнечные трекеры могут функционировать на основе различных приводных механизмов, реализующих регулировку угла наклона панелей как пассивными, так и активными способами. В активных трекерах применяются электродвигатели или гидравлические приводы, обеспечивающие перемещение фотоэлектрических модулей таким образом, чтобы они были ориентированы в сторону солнца. Такие системы, как правило, управляются посредством контроллера или программируемого логического устройства, которое обрабатывает данные от фотодатчиков или реализует алгоритмическое слежение за траекторией солнечного движения. Несмотря на более высокую стоимость, активные трекеры обеспечивают максимальную точность позиционирования и, как следствие, наивысшую эффективность преобразования солнечного излучения в электрическую энергию. В зависимости от конфигурации оси вращения, активные солнечные трекеры подразделяются на два основных типа: одноосные (SAT) и двухосные (DAT). В одноосных системах вращение солнечных модулей осуществляется вокруг одной оси, как правило, ориентированной в направлении север-юг [5].

Одноосные трекерные системы широко применяются в проектах коммунального масштаба, где ориентация панелей осуществляется по одной оси — горизонтальной или вертикальной. Такие трекеры следят за движением солнца в направлении восток–запад, обеспечивая оптимальный угол падения солнечного излучения на поверхность модулей в течение дня. Благодаря этому достигается значительное увеличение суточной выработки электроэнергии по сравнению со стационарными системами — в среднем на 25–35 %, в зависимости от климатических и географических условий региона [23]. Это делает одноосные трекеры особенно эффективными в зонах с высоким уровнем солнечной инсоляции. На рисунке 4 представлена конструктивная

схема одноосной трекерной установки, использованной в рамках настоящего исследования.

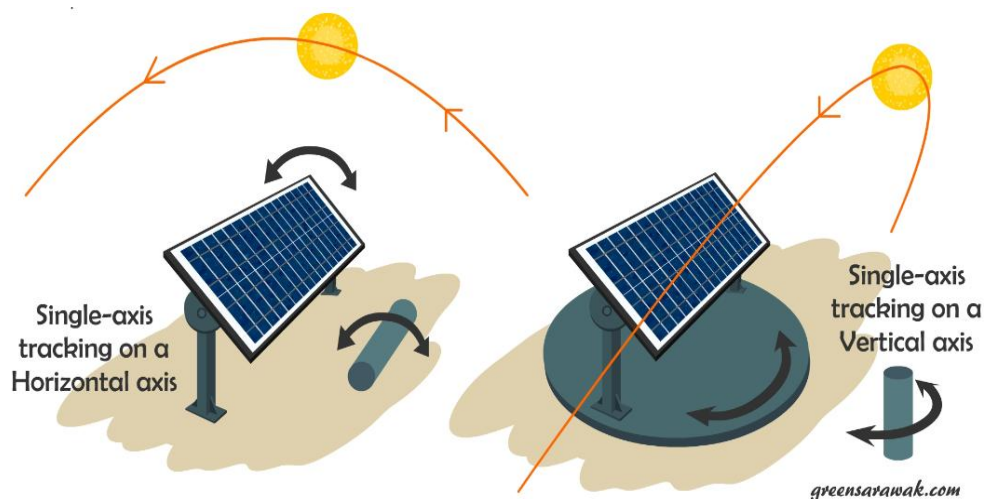


Рисунок 4 – Устройство одноосных трекерных систем

Двухосные трекерные системы способны обеспечить до 40 % дополнительной выработки электроэнергии в течение года по сравнению с традиционными стационарными установками [29]. В отличие от одноосных систем, двухосные трекеры обеспечивают перемещение модулей как по оси восток–запад, так и по оси север–юг, что позволяет им максимально точно отслеживать положение солнца на протяжении всего дня и в течение года. Подобные системы находят наибольшее применение в жилых и маломасштабных коммерческих проектах, особенно в условиях ограниченного пространства, обеспечивая при этом достаточную генерацию для покрытия основных энергетических потребностей.

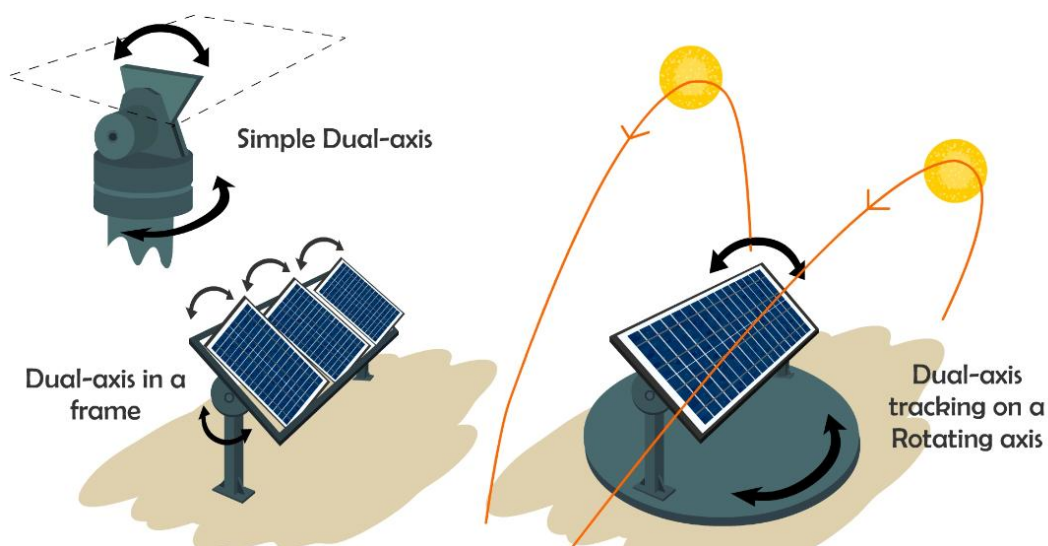


Рисунок 5 – Устройство двухосных трекерных систем

Как было рассмотрено ранее, стационарные способы установки солнечных модулей имеют ряд существенных ограничений, отрицательно влияющих на общую производительность фотоэлектрических систем. Одним из эффективных решений данной проблемы является применение солнечных трекеров, которые позволяют минимизировать угол отклонения между направлением прямого солнечного излучения и плоскостью модуля. Посредством различных приводных механизмов такие устройства обеспечивают динамическую ориентацию панелей в течение светового дня, поддерживая их в наиболее выгодном положении для поглощения солнечной энергии. Сравнительный анализ технических и эксплуатационных характеристик трекерных систем и стационарных конструкций представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Преимущества и недостатки трекерных систем

Преимущества	Недостатки
Повышенная общая эффективность системы	Более сложная конструкция
Высокая точность ориентации и стабильность работы	Повышенные капитальные затраты
Увеличенная продолжительность пребывания на пиковой мощности	Энергопотребление (для активных трекеров)
Снижение деградации модулей за счёт равномерного распределения нагрузки	Необходимость регулярного технического обслуживания
Возможность дистанционной корректировки угла наклона при изменении погодных условий	Снижение устойчивости конструкции при экстремальных погодных воздействиях

2 Практические решения для оптимизации работы солнечной фотоэлектрической станции в сложных погодных условиях на основе экспериментальных методов

2.1 Технические характеристики солнечной электростанции ЮКСЭС 50

С учётом возрастающего спроса на экологически чистые источники энергии и стремительного прогресса в области технологий возобновляемой энергетики, задача оптимизации функционирования солнечных фотоэлектрических станций приобретает стратегически важное значение. Современные исследования в данной области направлены не только на повышение энергетической эффективности СЭС, но и на укрепление устойчивости всей энергосистемы, снижение зависимости от ископаемых источников и минимизацию негативного воздействия на окружающую среду. Важным направлением также является разработка адаптивных алгоритмов управления и внедрение автоматизированных систем мониторинга, позволяющих учитывать погодные колебания, прогнозировать изменения в генерации и обеспечивать надёжную интеграцию солнечной генерации в централизованную энергетическую сеть [2].

Максимальная эффективность работы солнечных электростанций достигается при стабильной и ясной солнечной погоде. Однако в реальных условиях часто наблюдаются метеофакторы, неблагоприятные для оптимальной генерации энергии. В пасмурные или облачные дни возможности повышения производительности значительно ограничены. На сегодняшний день одним из немногих способов улучшения эффективности в таких условиях является замена панелей на модели с более высоким коэффициентом полезного действия, однако данный подход требует значительных финансовых вложений и, как правило, экономически необоснован. Одним из основных факторов, приводящих к снижению генерации на фотоэлектрических панелях (ФЭП), является влажное запыление, в том числе с содержанием углеродистых частиц, которое может вызывать потери выработки до 30 %. Кроме того, оснежение поверхности модулей приводит к существенному снижению мгновенного коэффициента полезного действия, превышающему 10 % [25]. При низком уровне солнечной инсоляции также наблюдается резкое увеличение погрешности при измерении производительности ФЭП, что затрудняет корректную оценку эффективности работы системы. Тем не менее, в отличие от полностью пасмурных условий, при переменной облачности или в период снегопадов сохраняется потенциал для повышения эффективности работы фотоэлектрических электростанций. Это обусловлено возможностью реализации адаптивных решений, направленных на оптимизацию работы станции в условиях нестабильной и экстремальной метеообстановки. В связи с этим разработка технологий, обеспечивающих повышение устойчивости и энергетической отдачи СФЭС

при неблагоприятных погодных условиях, представляет собой актуальное направление научных и прикладных исследований. С целью изучения влияния неблагоприятных погодных факторов на производительность солнечной электростанции были проведены экспериментальные исследования на действующей СФЭС мощностью 50 МВт, расположенной в посёлке Чулаккурбан Сузакского района Туркестанской области Республики Казахстан (см. рисунок 6). Полевые эксперименты на действующей СФЭС проводились без официальной сертификации, но их методика опиралась на технические подходы, зафиксированные в актуальных стандартах и нормативных документах. Например, международный стандарт IEC 62817:2014 (квалификация трекеров) описывает требования к поведению фотоэлектрических трекеров при сильном ветре, включая заданные «штилевые» позиции (wind stow) и специальные испытания на моменты под нагрузкой от экстремальных ветров [19]. Стандарт IEC 61215-1-1:2021 (а также его национальная версия СТ РК IEC 61215-1-1:2020) определяет ряд надёжностных испытаний для кристаллических модулей (термическое циклование, влагостойкость, статические и динамические нагрузки) и даже добавляет новый циклический (динамический) механический тест для моделирования действительных условий эксплуатации [20]. Национальный документ СП РК 2.04-01-2017 (Строительная климатология) содержит региональные климатические параметры (максимальная скорость ветра, экстремальные температуры, суммарная солнечная радиация и др.), используемые при проектировании сооружений в Казахстане [17].



Рисунок 6 – СЭС «ЮКСЭС 50», расположенная по координатам 43.747767 N, 69.233106 E

При анализе работы СФЭС учитывались именно такие статистические данные (например, абсолютный минимум температуры и месячные суммы солнечного сияния из СП РК 2.04-01-2017), а алгоритмы позиционирования

трекеров при сильном ветре были согласованы с принципами ИЕС 62817 (перевод модулей в безопасный горизонтальный или фиксированный угол). Таким образом, несмотря на практический характер исследований, применялись подходы, рекомендованные указанными стандартами.

В целях последующего анализа эффективности предлагаемых решений представляется целесообразным предварительно рассмотреть основные технические характеристики и проектные особенности исследуемой солнечной электростанции, на базе которой осуществлялись экспериментальные работы. Солнечная электростанция «ЮКСЭС 50» была введена в эксплуатацию 9 марта 2020 года в посёлке Чулаккурбан, Сузакского района, Туркестанской области Республики Казахстан с целью развития сектора возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в регионе. На территории площадью 129 га установлено 151 200 поликристаллических панелей Risen Energy RSM72-6-330P (330 Вт). Генерация осуществляется через 303 инвертора Huawei SUN 2000-185KTL-H1 по 175 кВт каждый, а также 13 трансформаторов номинальной мощностью 3150 кВА. Структурная схема оборудования станции представлена на рисунке 8. Инверторы отличаются высоким КПД, возможностью дистанционного управления и мониторинга в режиме реального времени, а также способностью по команде операторов генерировать или потреблять реактивную мощность.

Для визуализации размещения и ориентации оборудования была разработана трёхмерная модель одного из блоков станции с направлением модулей на запад под углом наклона 60° (азимут 150°) (см. рисунок 7). Прогнозируемая годовая генерация станции составляет 91 667 МВт·ч в первый год с последующим ежегодным снижением производительности на 0,7 %.

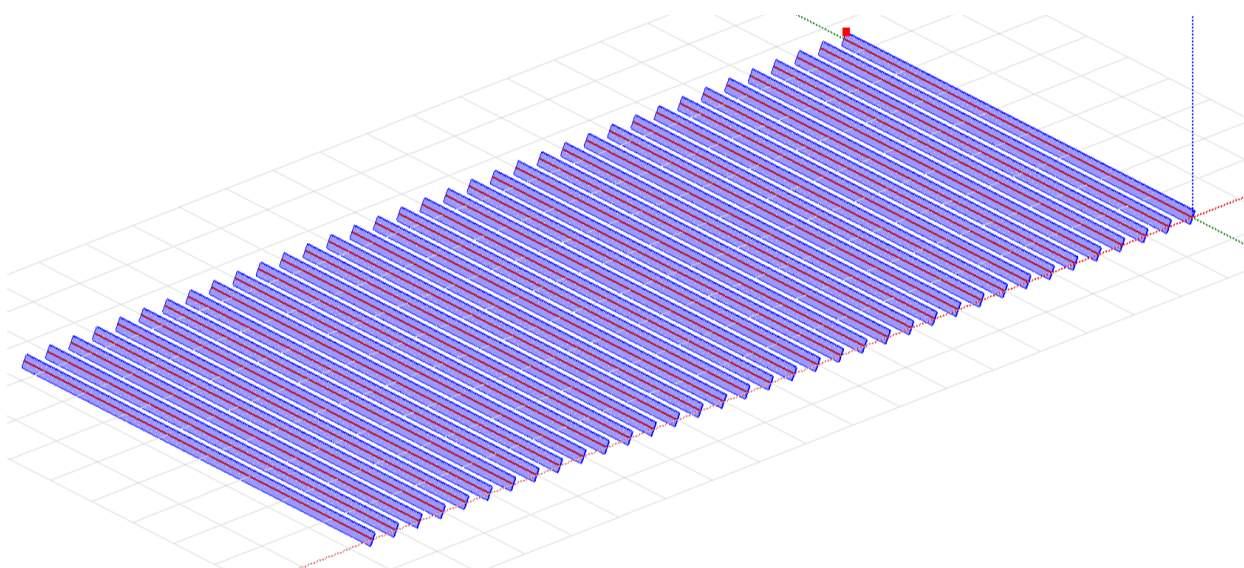


Рисунок 7 – 3D-модель одного из блоков СЭС «ЮКСЭС 50» с ориентацией модулей на запад под углом наклона 60° (150°)

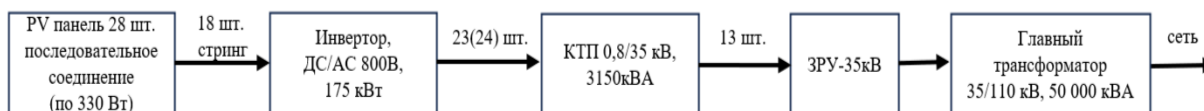


Рисунок 8 – Структурная схема оборудования СЭС «ЮКСЭС 50»

Станция оснащена современной трекерной системой слежения за солнцем от компании Arctech Solar, входящей в число крупнейших производителей трекеров. На рисунке 7 представлена 3D-модель одного из блоков СЭС «ЮКСЭС 50». В каждом блоке установлены 36 рядов трекерной системы (в некоторых блоках – 32 ряда). В одной трекерной системе смонтировано 84 фотоэлектрические панели, объединённые в три стринга по 28 панелей, соединённых последовательно. Общее число рядов трекерной системы на станции – 1 800. Трекерная система SkyLine – независимый горизонтальный одноосный (1P) трекер, ориентирующийся с востока на запад, с углом слежения $\pm 60^\circ$, редукторным slew-drive приводом на 28 VDC, потреблением $\approx 0,02$ кВт·ч/день, ветроустойчивостью до 47 м/с по ASCE7-10 и функцией backtracking. ASCE 7-10 — это десятое издание свода норм и стандартов Американского общества инженеров-строителей (American Society of Civil Engineers), официально называемое “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures”.

2.2 Методы защиты от скачков мощности в условиях переменной облачности

Солнечная энергия является одним из самых перспективных и экологически чистых источников энергии. Однако эксплуатация солнечных электростанций сталкивается с рядом вызовов, связанных с изменчивостью погодных условий. Одним из наиболее значимых факторов является переменная облачность, которая может вызывать скачки генерации и снижение эффективности работы оборудования. Эти явления требуют разработки и применения специальных технологий и методов управления, направленных на повышение надежности и производительности солнечных электростанций. Одной из ключевых проблем в эксплуатации солнечных электростанций является эффект облачной кромки (“cloud edge effect”) [23].

В рамках проведённых экспериментов особое внимание было уделено условиям малооблачной погоды, при которых наблюдалось проявление так называемого эффекта облачной кромки. Данный эффект заключается во временном увеличении солнечной радиации вследствие преломления и отражения солнечного света по краям облаков, что приводит к локальному усилению потока излучения. В результате прохождения облака перед солнечным диском происходит кратковременная фокусировка солнечного света, вызывающая резкое повышение интенсивности освещения на

поверхности модулей. Это, в свою очередь, приводит к внезапному росту выходной мощности фотоэлектрической станции. Такие всплески генерации создают дополнительную нагрузку на силовое оборудование, включая инверторы, кабельные линии и распределительные устройства. Зафиксированы случаи срабатывания релейных защит при кратковременном превышении токов на 30–40 % от номинального значения в течение нескольких секунд. Подобные резкие колебания активной мощности могут оказывать дестабилизирующее влияние на локальную энергосистему, нарушая баланс между выработкой и потреблением электроэнергии. Следует отметить, что эффект облачной кромки преимущественно наблюдается в период с полудня до второй половины дня, когда солнечное излучение достигает максимальных значений. В утренние и предвечерние часы данное явление выражено значительно слабее, что обусловлено меньшими углами падения солнечных лучей и сниженной общей интенсивностью радиации.

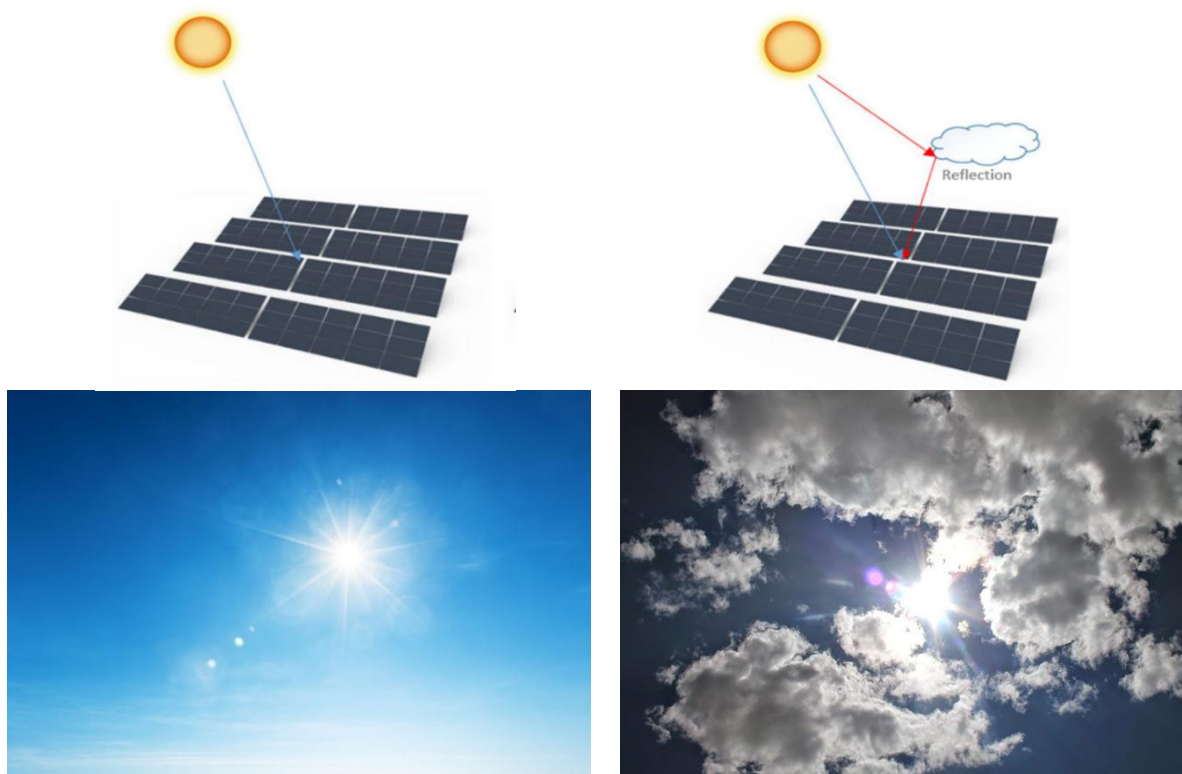


Рисунок 9 – Проявление эффекта облачной кромки при малооблачном небе

На исследуемой солнечной электростанции установлены 303 инвертора модели SUN2000-185KTL-N1 производства компании Huawei, каждый из которых обладает номинальной мощностью 175 кВт. Управление и контроль за их работой осуществляется дистанционно с использованием системы SmartLogger, что обеспечивает централизованное диспетчерское управление в режиме реального времени. Интеграция данной системы мониторинга

позволяет не только оперативно отслеживать техническое состояние инверторного оборудования, но и своевременно выявлять и диагностировать возможные отклонения в работе. Это, в свою очередь, способствует повышению надёжности эксплуатации станции, улучшению показателей её технической эффективности и оптимизации производственного процесса в целом.

Инверторное оборудование современных фотоэлектрических станций оснащается системой отслеживания точки максимальной мощности (MPPT — Maximum Power Point Tracking), предназначенной для динамического поиска и удержания оптимальной рабочей точки солнечных модулей. Алгоритм MPPT функционирует на основе непрерывного измерения параметров напряжения и тока, определяя точку, при которой произведение этих величин (т.е. электрическая мощность) достигает максимального значения. Такая методика позволяет эффективно извлекать максимальное количество энергии в стандартных условиях при устойчивом уровне солнечной радиации [21]. Однако в условиях проявления эффекта облачной кромки, когда интенсивность солнечного излучения кратковременно возрастает из-за преломления и отражения света на границе облака, MPPT-алгоритм, следуя своей задаче поиска наивысшей выходной мощности, может привести к резкому скачку активной мощности [4]. В отдельных случаях такие скачки превышают допустимые токовые значения, что оказывает неблагоприятное воздействие на работу инверторов и другого оборудования станции, а также может нарушить баланс в энергосистеме из-за внезапных перепадов генерации.

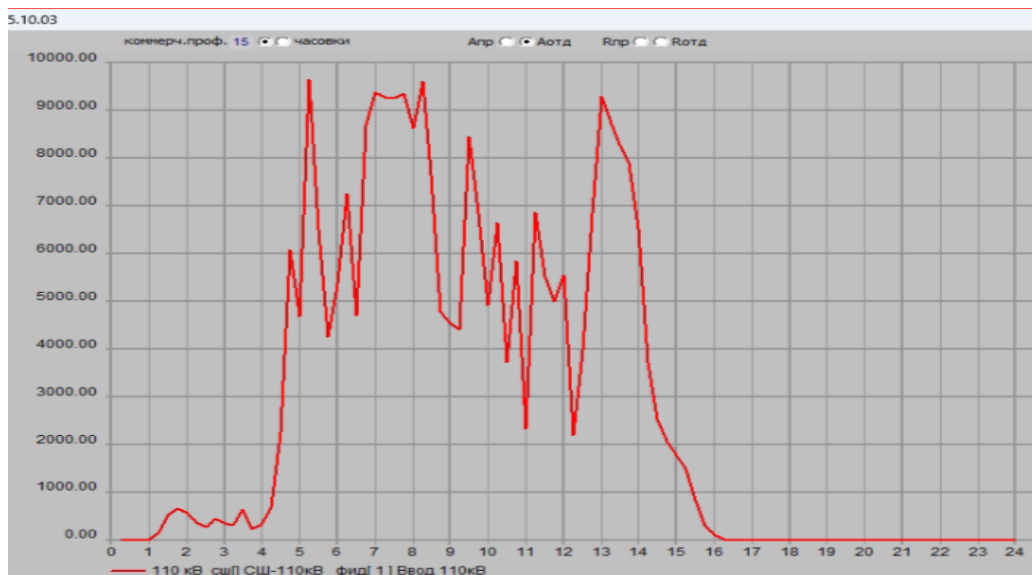


Рисунок 10 – Генерация активной мощности в малооблачный день с учетом срабатывания релейной защиты, отключающей некоторые блоки солнечной электростанции.

Как показано на рисунке 10, в условиях переменной облачности и резкого повышения инсоляции наблюдается срабатывание защитных устройств, приводящее к кратковременному отключению отдельных сегментов солнечной станции. Таким образом, несмотря на высокую эффективность технологии MPPT в стабильных метеоусловиях, при резких и кратковременных изменениях освещённости требуется внедрение дополнительных защитных мер и стратегий управления для обеспечения устойчивости функционирования фотоэлектрической электростанции [21].

На рисунке 11 представлена страница интерфейса SCADA-системы солнечной электростанции «ЮКСЭС 50», зафиксированная в малооблачный день. В момент съёмки наблюдается пик активной мощности по трансформатору №10, составляющий 4242,7 кВт, что превышает его номинальную нагрузочную способность примерно на 10 %. Подобные всплески возникают вследствие кратковременного увеличения солнечной радиации, вызванного эффектом облачной кромки. Отмечается также высокий коэффициент мощности ($\cos \varphi = 1.0$), указывающий на работу системы без потребления реактивной энергии. Другие трансформаторы, подключённые к трекерной системе, также демонстрируют близкие к номинальным или повышенные значения активной мощности. Такие пики создают нагрузку на электротехническое оборудование и могут стать причиной кратковременного превышения токов, требующего активации защитных устройств.

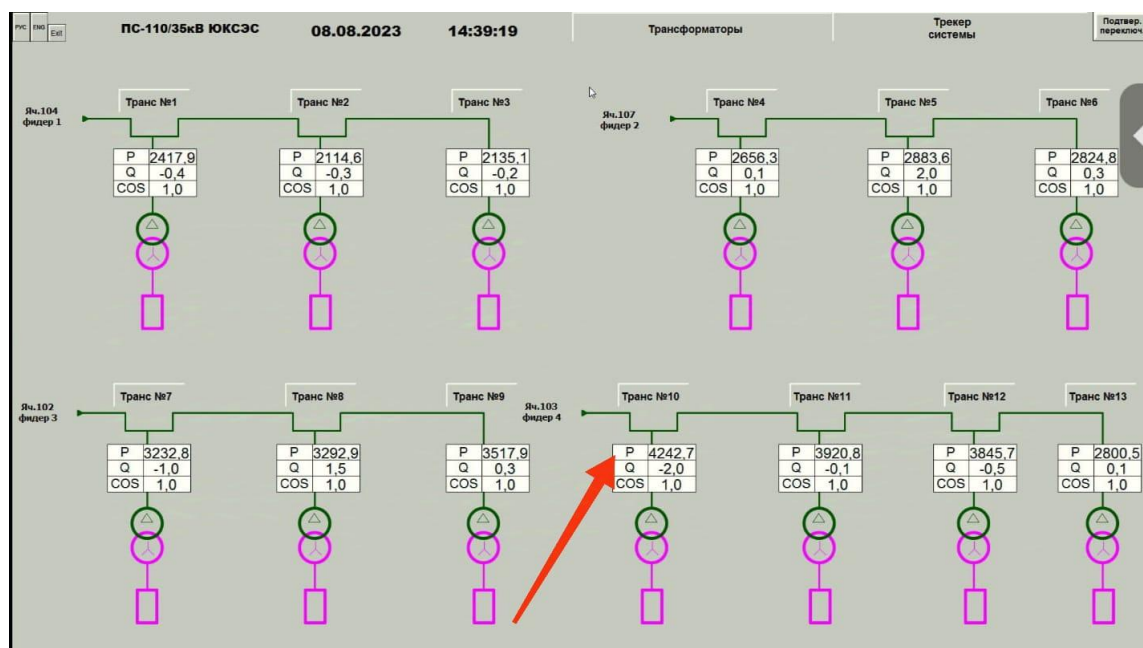


Рисунок 11 – Пиковые значения активной мощности в малооблачный день, превысившие номинальную мощность на 10%.

В рамках экспериментальных исследований на солнечной фотоэлектрической электростанции были внедрены программные меры по ограничению активной мощности до установленных номинальных уровней с

использованием программной платформы Huawei Enspire Power System (FusionSolar) и интеллектуального контроллера SmartLogger3000. Указанное программно-аппаратное решение обеспечивает дистанционный мониторинг параметров инверторов Sun2000, предоставляет возможность оперативного управления активной и реактивной мощностью через веб-интерфейс, а также позволяет задавать графики ограничения мощности в режиме limited feed-in. Реализация данных функций способствовала повышению стабильности работы оборудования, снижению вероятности перегрузок и предотвращению кратковременных токовых скачков, возникающих, в частности, при прохождении облачных фронтов. Это, в свою очередь, позволило значительно повысить общую надёжность функционирования электростанции. За счёт комплексного подхода к управлению мощностью была снижена вероятность аварийных отключений, обеспечена более устойчивая генерация и продлён срок службы силовых компонентов инверторного оборудования. Кроме того, применение системы интеллектуального управления способствовало улучшению интеграции СФЭС в региональную энергосистему и повышению качества поставляемой энергии [21].

2.3 Повышение эффективности солнечных электростанций с трекерной системой. Подходы к улучшению работы во время снегопада

Одним из ключевых факторов, отрицательно влияющих на эффективность работы солнечных электростанций, являются неблагоприятные погодные условия, в частности зимние осадки в виде снега. Накопление снежного покрова на поверхности фотоэлектрических модулей значительно снижает их способность к преобразованию солнечного излучения в электрическую энергию. При этом важную роль играют не только объёмы снегопадов, но и сопутствующие метеоусловия — такие как колебания температуры и уровень влажности воздуха. Эти параметры напрямую влияют на физические свойства снега, делая его более влажным и липким, что способствует образованию более плотного и устойчивого слоя на поверхности панелей, усугубляя эффект затенения и снижая производительность системы. Поэтому задача очистки поверхности ФЭБ от снега актуальна для всех регионов, где снежный покров лежит несколько месяцев. Практически это вся территория Российской Федерации, Канады, Финляндии, Норвегии, горные районы Центральной Азии, Кавказа и т.д. На рисунке 12 представлено снежное покрытие солнечных панелей и процесс его ручной очистки, что демонстрирует масштаб проблемы при отсутствии автоматизированных систем очистки [14]. Ручная очистка требует значительных трудозатрат и сопряжена с рисками повреждения модулей и нарушений техники безопасности. Кроме того, задержка в удалении снега приводит к простоему оборудования и снижению общей выработки энергии в зимний период. Это

подчёркивает необходимость внедрения автоматизированных или пассивных методов самоочистки панелей в регионах с продолжительными снегопадами.

Согласно данным, зафиксированным на солнечной электростанции «ЮКСЭС 50» в январе 2024 года, толщина снежного покрова на поверхности фотоэлектрических модулей достигала 8–10 см. При этом снег удерживался на панелях в течение 3–4 суток, существенно снижая их энергетическую отдачу.

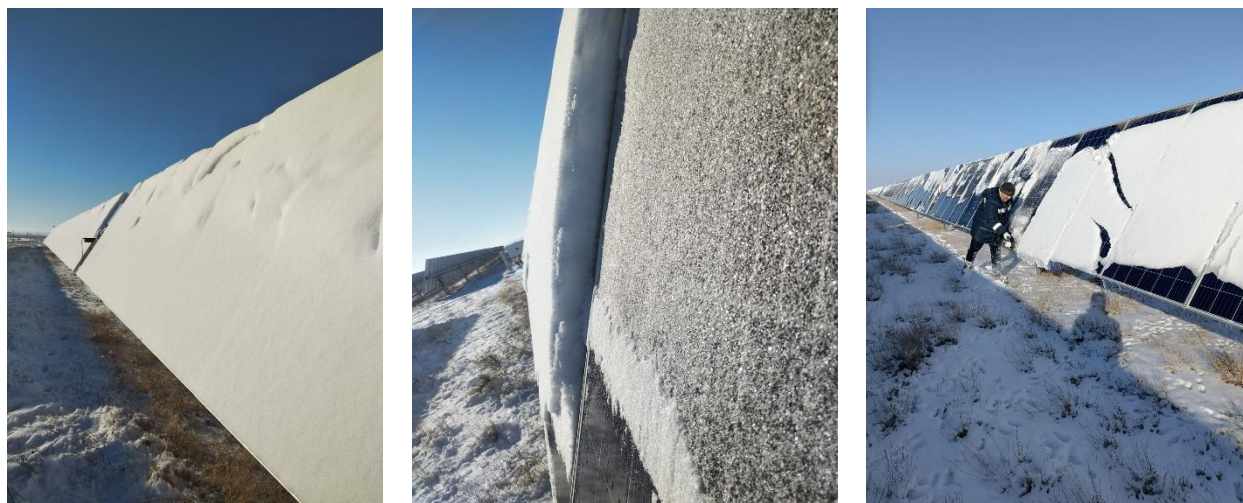


Рисунок 12 – Накопление снега на солнечных панелях и организация ручной очистки

Таблица 4 – Потери мощности после снегопада в 2024 году на СЭС «ЮКСЭС 50»

Дата	Потенциальная выработка электроэнергии, тыс.кВт·час	Фактическая генерация с учетом потерь (Снег), тыс.кВт·час
09.01.2024	62,370	55,930
10.01.2024	60,374	54,804
11.01.2024	104,283	13,322
12.01.2024	158,669	117,547
13.01.2024	110,270	100,051
14.01.2024	31,933	28,842
15.01.2024	85,821	1,837
16.01.2024	79,335	2,596
17.01.2024	68,856	2,973
18.01.2024	184,116	11,839
19.01.2024	115,759	15,141
20.01.2024	209,064	38,956
21.01.2024	178,129	59,258
22.01.2024	155,177	73,958

Существующие методы очистки солнечных панелей от снега, как и в случае пылевого загрязнения, условно делятся на пассивные и активные. Пассивные способы основаны на естественных процессах — таянии и самопроизвольном соскальзывании снега с поверхности фотоэлектрических модулей. Продолжительность такой очистки может варьироваться от нескольких часов до нескольких дней и зависит от совокупности факторов: температуры окружающего воздуха, уровня солнечной радиации, а также угла наклона панелей. В рамках нашего эксперимента особое внимание уделялось изменению угла наклона солнечных панелей, что способствовало более быстрой самоочистке от снежного покрова за счёт гравитационного скольжения.

Одним из эффективных подходов к повышению производительности солнечных электростанций с трекерной системой в условиях интенсивных снегопадов является внедрение динамического управления углом наклона фотоэлектрических модулей. Существенное накопление снежного покрова на панели, как правило, обусловлено тем, что в ночное время, особенно в зимний период (до 16–17 часов), трекерная система переводит модули в практически горизонтальное положение — с углом наклона около 75° относительно вертикали. Такая конфигурация выбирается в целях предотвращения механических повреждений, вызванных сильными ветровыми нагрузками.

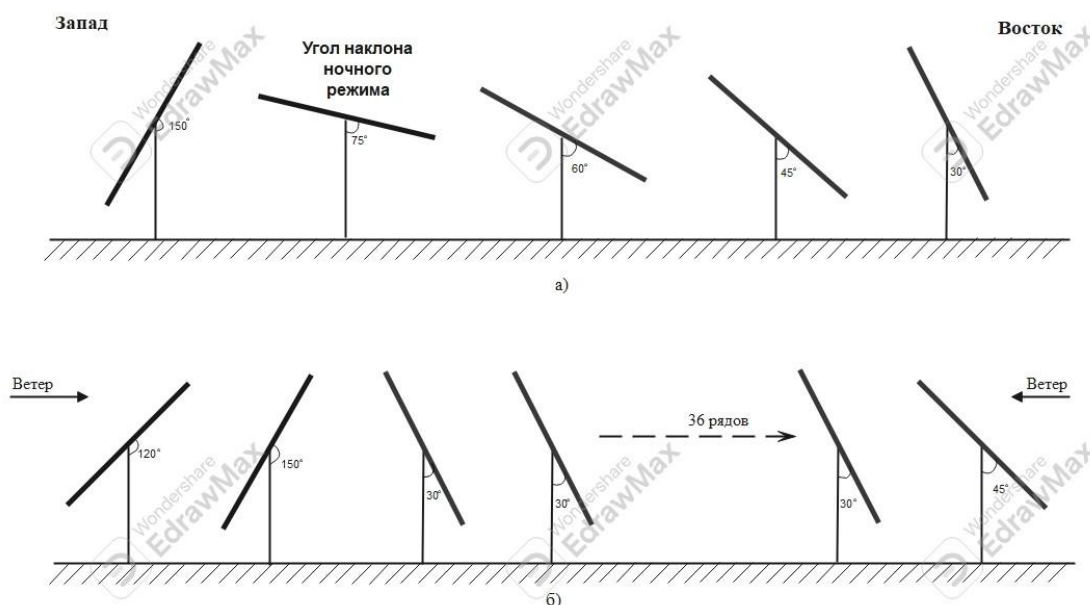


Рисунок 13 – Возможные углы наклона трекерной системы:
а) Варианты углов наклона в течение суток; б) Ночной режим наклона для предотвращения скопления снега с учётом защиты от ветров.

На исследуемой СЭС установлены 1800 независимых подвижных трекеров компании Arctech Solar. Каждый трекер оснащён отдельным блоком управления, через который в программном обеспечении можно задать

следующие параметры: дата и время, географические координаты, часовой пояс, максимальные и текущие углы наклона, режимы работы, угол наклона при сильном ветре, угол наклона в ночном режиме и др. В одном блоке станции установлены 36 рядов трекеров (в отдельных случаях — 32 ряда). В ходе экспериментальных работ угол наклона в ночном режиме был увеличен до максимально вертикального значения в зимний период. Это позволило ускорить сход снега с поверхности панелей под действием силы тяжести и существенно снизить риск его накопления. Особое внимание уделялось крайним рядам (1-му и 36-му), которые в ночном режиме были ориентированы под углами 120° и 45° соответственно. Такая ориентация не только обеспечивает дополнительную защиту крайних панелей от механических повреждений при сильных ветрах, но и способствует направлению воздушных потоков мимо центральных рядов, улучшая их аэродинамическую разгрузку [21]. Это особенно важно в случае отказа автоматической системы перевода трекеров в безопасное положение при штормовых порывах, так как минимизирует риски повреждения конструкции.

В ходе проведённых экспериментальных исследований были разработаны и апробированы практические подходы, направленные на оптимизацию функционирования солнечных электростанций в условиях неблагоприятной метеобстановки. В частности, для снижения негативного воздействия эффекта облачной кромки успешно применялась стратегия ограничения активной мощности инверторов. Данная мера позволила стабилизировать генерацию, снизить пиковые нагрузки на оборудование и предотвратить его перегрузку. Результаты, полученные в рамках эксперимента, подтверждают выводы модельного анализа, представленного в работе финских исследователей Järvelä и Valkealahti [15], и демонстрируют аналогичные закономерности в части устойчивости генерации и снижения рисков перенапряжения. С целью противодействия накоплению снежного покрова на модулях в зимний период предложено корректировать ночное положение трекеров, изменяя угол наклона панелей таким образом, чтобы способствовать ускоренному естественному удалению снега с их поверхности. Указанный метод находится на этапе экспериментальной проверки, однако предварительные результаты указывают на его значительный потенциал и предполагаемое преимущество по сравнению с ранее применявшимися подходами. Полученные в ходе работы данные о закономерностях самоочищения панелей от снега подтверждаются результатами исследований, выполненных специалистами Michigan Technological University [16].

Таким образом, представленные в исследовании решения способствуют повышению надёжности и эффективности функционирования солнечных фотоэлектрических электростанций, снижая влияние экстремальных погодных условий и обеспечивая стабильность работы в составе региональных энергосистем.

3 Климатические условия Казахстана для проектирования солнечных электростанций

С учётом интенсивного роста солнечной энергетики в Казахстане возникает необходимость выбора наиболее эффективной конфигурации электростанций. Каждый тип установки — стационарная или трекерная — обладает своими преимуществами и ограничениями. Трекерные системы, как правило, обеспечивают более высокую энергоотдачу за счёт слежения за движением Солнца, однако требуют дополнительных затрат и сложной системы управления. При этом их эффективность существенно зависит от климатических условий региона и параметров эксплуатации.

Для объективной оценки различий в производительности в данной работе проведён анализ фактической энерговыработки СЭС мощностью 50МВт с трекерной и фиксированной системами в Туркестанской, Жамбылской, Алматинской, Карагандинской и Кызылординской областях, а также выполнено моделирование этих объектов с использованием программного комплекса PVsyst.

Солнечная энергия занимает ведущее место среди возобновляемых источников энергии благодаря своей универсальной доступности и значительному потенциалу. С термодинамической точки зрения, солнечное излучение, исходящее от источника с яркостной температурой порядка 6000 °С, представляет собой высококачественный первичный энергетический ресурс. Это позволяет рассматривать его в качестве эффективной основы для преобразования в различные формы энергии — электрическую, тепловую, холодильную и другие — с потенциально высоким коэффициентом полезного действия. Важным фактором для эффективности СЭС являются климатические особенности и географическое расположение местности [10]. Климат определяет уровень солнечной радиации, её сезонную и суточную изменчивость, а также температурный режим, который влияет на производительность фотомодулей и тепловые потери в системе. Географические характеристики — широта, долгота и рельеф — определяют оптимальные углы наклона и ориентации солнечных модулей или трекеров, а также влияют на затенение, уровень отражённой от поверхности радиации и, как следствие, на общий энергетический выход СЭС. Климатические условия Казахстана характеризуются высокой продолжительностью солнечного сияния, составляющей в среднем от 2000 до 3000 часов в год. Так, например, в северных регионах, таких как г. Костанай, среднегодовая продолжительность солнечного сияния достигает 2132 часов, что на 400 часов превышает аналогичный показатель для Москвы, находящейся на той же широте. В южных областях, в частности в г. Кызылорда, данный показатель достигает 3062 часов в год. Подобные значения обусловлены не только географическим положением, но и низкой облачностью в тёплое время года, особенно в южной части страны. Солнечная радиация тесно связана с характером распределения ясных и пасмурных дней. В северных регионах

число ясных дней составляет около 120 в год, тогда как на юге оно достигает 260 дней [10]. С технической точки зрения основными ограничениями использования солнечной энергии являются её неравномерность во времени (суточные, сезонные и погодные колебания), а также относительно невысокая плотность энергетического потока. За пределами атмосферы солнечный поток составляет около $1,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$, на земной поверхности в условиях ясного неба в полдень — около $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$, тогда как среднегодовое значение с учётом ночного времени и облачности варьируется от 150 до $250 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$. При этом годовое поступление солнечной энергии на 1 м^2 поверхности эквивалентно 150–250 кг условного топлива (где 1 кг у.т. соответствует 7 Мкал). Совокупный объём прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность по территории Казахстана оценивается на уровне около 2 млн $\text{ТВт} \cdot \text{ч}$ в год.

Солнечная инсоляция представляет собой интегральную характеристику, определяющую количество солнечного излучения, достигающего поверхности (включая прямое, рассеянное и отражённое излучение). Под облучаемой поверхностью может пониматься любая физическая плоскость, в том числе поверхность солнечной панели, преобразующей солнечную энергию в электрическую. Инсоляция измеряется в $\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ — то есть как количество энергии, полученной одним квадратным метром поверхности за определённый период времени. Следует отметить, что расчётные значения обычно приводятся для идеализированных условий, предполагающих отсутствие облачности и перпендикулярное падение солнечных лучей на поверхность. Географическое распределение показателей инсоляции по территории Республики Казахстан представлено на рисунке 14, составленном на основе климатических данных ресурса Solargis [12].

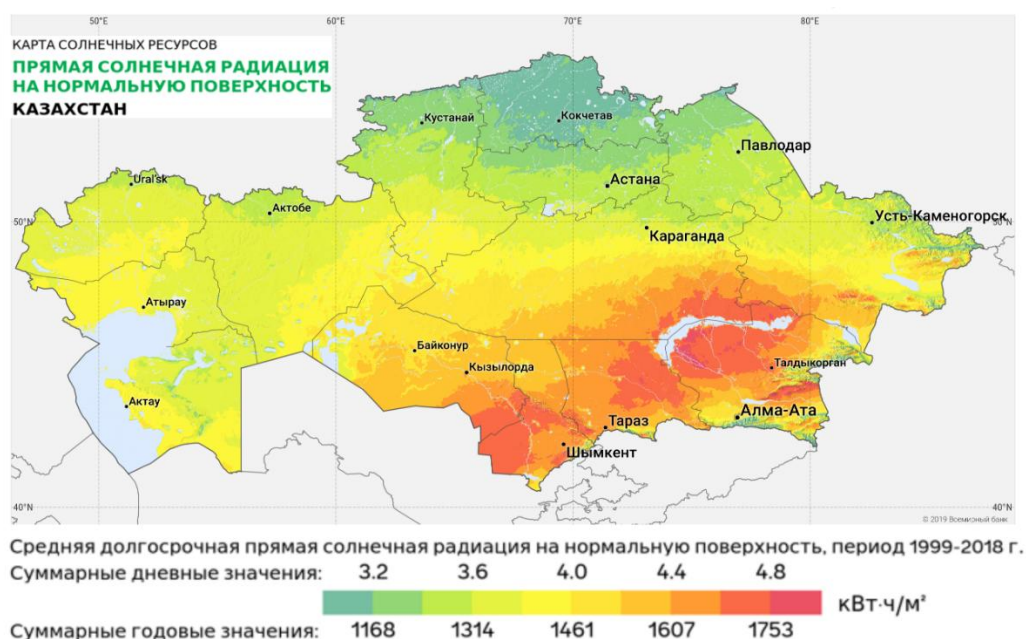


Рисунок 14 – Карта солнечных ресурсов Казахстана (solargis.com)

Радиацию, приходящую к земной поверхности непосредственно от солнечного диска, называют прямой солнечной радиацией DNI (Direct Normal Irradiance), в отличие от радиации, рассеянной в атмосфере. Солнечная радиация распространяется от Солнца по всем направлениям. Но расстояние от Земли до Солнца так велико, что прямая радиация падает на любую поверхность на Земле в виде пучка параллельных лучей, исходящего как бы из бесконечности [11]. Для трековых солнечных электростанций важен этот показатель так как трекер ориентирует поверхность модуля перпендикулярно солнечному пучку, максимизируя сбор прямой радиации.

В Казахстане средняя дневная глобальная горизонтальная радиация (GHI) лежит в диапазоне 3,09–4,58 кВт·ч/м²·день, из которой прямая нормальная (DNI) составляет 3,04–4,79 кВт·ч/м²·день, а рассеянная горизонтальная (DHI) – 1,44–1,97 кВт·ч/м²·день. Это соответствует годовому $GHI \approx 1200\text{--}1800$ кВт·ч/м²·год и 2200–3000 часа солнечного сияния в год. Для эффективности СЭС очень важна солнечная радиация конкретной местности, исходя из чего выбирается местоположение электростанции. В рамках исследования были изучены действующие СЭС в южных регионах Республики, где наблюдается высокий уровень инсоляции. Эти территории характеризуются большим количеством солнечных дней в году, минимальной облачностью и благоприятными климатическими условиями, что способствует высокой производительности объектов [12].

3.1 Климатические условия Алматинской области

Алматинская область характеризуется резко континентальным климатом с выраженными сезонными колебаниями температуры. Средняя температура зимой на равнине варьируется от –10 до –13 °С, в предгорьях от –6 до –13 °С. Средняя температура июля составляет около +25 °С на равнине и до +26 °С в предгорьях [10]. Тёплый период (с температурой выше 0 °С) продолжается примерно 220–240 дней, обеспечивая длительный период генерации энергии. Количество годовых осадков изменяется от 125 мм на севере области до 900 мм в горных районах юга. Большая часть осадков (50–75%) выпадает в тёплый период года. В зимние месяцы количество осадков составляет около 30% от годовой нормы, устойчивый снежный покров сохраняется примерно 3–4 месяца, со средней максимальной высотой до 22 см и продолжительностью до 102 дней. Средняя годовая скорость ветра в области колеблется от 1,5 до 3,5 м/с, с преобладанием местной горно-долинной циркуляции и фёнов. В зимний период в долинах отмечается слабый ветер и штиль, летом усиливается бризовая циркуляция, способствующая естественной вентиляции и снижению пыльной нагрузки на солнечные панели. Относительная влажность умеренная, зимой повышается до 65–75%, иногда вызывая туманы, влияющие на утреннюю генерацию. Летом относительная влажность снижается до 30–40%, создавая ясную атмосферу и

благоприятные условия для работы солнечных панелей. Среднее годовое число дней с температурой ниже -25°C составляет около 11–12 дней, а число дней с температурой выше $+30^{\circ}\text{C}$ – от 9,5 до 11,4 дней. Климатические параметры теплого периода года обеспеченностью 0.99 по температуре воздуха достигают около 31°C .

Таким образом, климатические условия Алматинской области являются благоприятными для эксплуатации солнечных электростанций. Это объясняется, в частности, относительно небольшим числом экстремально жарких дней, что снижает потери эффективности солнечных модулей в летний период, а также частыми дождями, способствующими естественному очищению панелей и уменьшению потерь выработки из-за их загрязнения.

Однако при этом необходимо учитывать локальные особенности, такие как облачность и снеговой покров. Среднегодовая продолжительность солнечного сияния в области значительно различается. В районе города Конаева она достигает 2826 часов из возможных 3594,2 часов, тогда как в предгорных районах наблюдаются более низкие значения. Оставшееся время приходится на пасмурные и облачные дни, что также следует учитывать при проектировании и расчёте выработки солнечной энергии [10].

3.2 Климатические условия Туркестанской области

Туркестанская область расположена на юге Казахстана и отличается резко континентальным и засушливым климатом. Континентальность проявляется в больших суточных и сезонных амплитудах температуры: жаркое длительное лето сменяется короткой относительно мягкой зимой. Область простирается от пустынь на западе до предгорий и гор на востоке, поэтому климатические условия разнообразны по территории.

Летний сезон отличается продолжительной жаркой погодой. Средняя температура июля варьируется от $+20^{\circ}\text{C}$ на северных возвышенных участках до $+30^{\circ}\text{C}$ на южных равнинах. В городе Туркестан этот показатель составляет $+28...+29^{\circ}\text{C}$, а дневной максимум достигает $+36^{\circ}\text{C}$. Абсолютные максимумы температуры, зафиксированные в пустыне Кызылкум, достигают $+49...+51^{\circ}\text{C}$. Такие значения могут вызывать нагрев фотоэлектрических модулей, что приводит к снижению их эффективности. Зимний период, напротив, короткий и относительно мягкий, особенно в южных районах. Средняя температура января в Туркестане составляет около -4°C . Снежный покров, как правило, неустойчив и сохраняется лишь в течение 4–5 недель, преимущественно с конца декабря до конца января. В ряде лет (примерно 40 %) он может вообще отсутствовать или формироваться незначительно. Средняя высота снежного слоя составляет около 5 см. Благодаря этим условиям необходимость в очистке панелей от снега возникает редко.

Безморозный период продолжается около 6–7 месяцев — с начала апреля до конца октября. Продолжительность периода со среднесуточной температурой выше 0°C составляет порядка 240–250 дней, а со среднесуточной температурой выше $+10^{\circ}\text{C}$ — около полугода. Это обеспечивает возможность стабильной круглогодичной работы солнечной электростанции. Ветровые условия также способствуют надёжной эксплуатации оборудования. В регионе преобладают северные и северо-восточные ветры со средней скоростью от 1,9 до 3,9 м/с. В более открытых и возвышенных районах, особенно в восточной части, средние значения ветра достигают верхней границы диапазона. В летние месяцы, при значительном прогреве поверхности, ветровая активность увеличивается, и в июле–августе средняя скорость достигает около 5 м/с, с возможными порывами до 10–15 м/с. Несмотря на это, дни с экстремально высокими значениями ветра (свыше 15 м/с) фиксируются менее чем в 2 % случаев в течение года. Особое значение имеет высокая обеспеченность солнечной радиацией. Годовая сумма солнечного излучения на горизонтальную поверхность в г. Туркестан достигает 7000 МДж/м^2 при ясной погоде, что соответствует приблизительно $1940 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^2$. С учётом сезонной облачности фактическое значение составляет около $1700\text{--}1800 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^2$, что является одним из самых высоких показателей в пределах Республики Казахстан. Продолжительность солнечного сияния также находится на экстремально высоком уровне. Из максимально возможных 3552 часов солнцестояния в году около 3098 часов приходится на фактическое солнечное сияние, что составляет примерно 87 % всего светового времени. В летние месяцы продолжительность солнечного сияния достигает 12–13 часов в сутки, причём полностью пасмурные дни практически отсутствуют. В среднем по году насчитывается до 260 ясных дней, и только около 10–30 дней являются пасмурными, из которых полностью без солнца — лишь 10–15 дней, в основном в зимний период. Такая высокая солнечная активность обеспечивает стабильное и интенсивное поступление энергии на поверхность фотоэлектрических модулей. Климат региона отличается также низкой влажностью воздуха, что минимизирует коррозионные процессы и способствует долговечности оборудования. Даже в зимний период, несмотря на повышенную относительную влажность, количество осадков остаётся низким, а вероятность образования наледи на поверхности панелей крайне мала. Кроме того, в условиях сильного прогрева и сухости воздуха наблюдается определённая запылённость, которая требует регулярного мониторинга и профилактики загрязнений модулей.

Таким образом, совокупность климатических характеристик — высокая солнечная радиация, большая продолжительность солнечного сияния, тёплый и длительный безморозный период, мягкая зима и низкая влажность — формирует чрезвычайно благоприятную среду для эффективной и надёжной эксплуатации солнечных электростанций в Туркестанской области.

3.3 Климатические условия Жамбылской области

Жамбылская область характеризуется резко континентальным и засушливым климатом, формируемым под влиянием её внутреннего расположения на Евразийском материке и удалённостью от океанов. Значительную часть территории занимают пустыни (Бетпак-Дала, Мойынкум), а на юго-западе, юге и юго-востоке возвышаются горы (хребты Каратау и Северного Тянь-Шаня), сглаживающие климатические контрасты и создающие заметные локальные различия. Континентальность климата проявляется в резких суточных и сезонных перепадах температуры, а переход от зимы к лету происходит стремительно. Лето продолжительное и жаркое: средняя июльская температура в Таразе составляет около $+25^{\circ}\text{C}$, в предгорьях, например в районе поселка Бауыржан Момышулы, несколько ниже. Дневные максимумы летом часто превышают $+30^{\circ}\text{C}$, а в отдельные дни воздух может нагреваться до $+45...48^{\circ}\text{C}$ (в Таразе зарегистрирован абсолютный максимум $+43,7^{\circ}\text{C}$).

Зимний период в регионе отличается большей суровостью, чем можно ожидать для данной широты. Средняя температура января составляет примерно -3°C в городе Тараз, по области варьируя от $-4...-7^{\circ}\text{C}$ на юге до $-8...-12^{\circ}\text{C}$ в северных районах. Продолжительность тёплого периода со средней суточной температурой выше 0°C составляет 260–270 дней в году, охватывая практически весь весенне-осенний сезон [10].

Количество годовых осадков невелико, особенно в равнинных районах (от 140 до 220 мм в год). В городе Тараз среднегодовая норма достигает 340–360 мм, а в самых засушливых районах на северо-востоке области (близ озера Балхаш) составляет около 135 мм. В предгорьях и горах осадков больше: в районе поселка Бауыржан Момышулы выпадает до 300 мм в год, а на наветренных склонах Киргизского Алатау – до 400–500 мм. В предгорных районах зимой возможны обильные снегопады, что требует усиления несущих конструкций солнечных панелей и организации дренажа территории СЭС.

Преобладающие ветры в регионе восточного и северо-восточного направлений. Средняя скорость ветра составляет 2,5–3,5 м/с, что свидетельствует о частых штилях и слабом ветре. При этом ветер в летний период благоприятен для охлаждения солнечных панелей, снижая их температурные потери. Регион обладает высоким уровнем солнечной инсоляции благодаря малой облачности: в Таразе продолжительность солнечного сияния достигает около 2800 часов в год ($\sim 63\%$ от возможного), а в пустынных районах северной части области — до 3000 часов [9].

Таким образом, климат Жамбылской области, несмотря на некоторые экстремальные проявления (жаркие дни, пыль, локальные снегопады), в целом благоприятен для эксплуатации солнечных электростанций. Правильное проектирование и инженерные решения позволят эффективно использовать его значительный солнечный потенциал.

3.4 Климатические условия Кызылординской области

Климат города Кызылорда характеризуется резко континентальным и засушливым режимом. Для него типичны жаркое, продолжительное лето и короткая холодная малоснежная зима. Согласно классификации климатов Кёппена, Кызылорда относится к категории пустынного климата умеренных широт (BWk) – с крайне скудными осадками, жарким летом и холодной зимой. Среднемесячная температура воздуха в наиболее тёплый период года (июль) составляет порядка $+27...+28^{\circ}\text{C}$, тогда как в наиболее холодный месяц (январь) температура опускается до $-7...-8^{\circ}\text{C}$. Годовая амплитуда температур достаточно велика: зафиксированы экстремальные значения от -40°C до $+46^{\circ}\text{C}$. Продолжительность безморозного периода составляет в среднем 6–7 месяцев — с начала апреля до конца октября, что свидетельствует о длительном тёплом сезоне. Период с положительными среднесуточными температурами (выше 0°C) продолжается около 240–250 суток, а интервал со среднесуточной температурой свыше $+10^{\circ}\text{C}$ охватывает приблизительно половину года — с апреля по октябрь. Осадков в Кызылорде выпадает крайне мало – в среднем не более 100–150 мм в год. Их сезонное распределение неравномерно: до 60 % годового объёма приходится на позднюю зиму и весну, тогда как летние месяцы практически засушливые. В самые жаркие периоды наблюдается очень низкая относительная влажность воздуха, что способствует преобладанию ясной погоды. Хотя иногда случаются кратковременные ливни, даже суточные максимумы осадков редко превышают несколько десятков миллиметров. Засушливый климат в сочетании с периодически сильными ветрами обуславливает возникновение пыльных бурь в тёплое время года, которые представляют собой характерное климатическое явление региона [10].

Регион Кызылорды обладает высоким уровнем солнечной радиации, что чрезвычайно благоприятно для СЭС. По данным многолетних наблюдений, город получает порядка 2900–3000 часов солнечного сияния в год, то есть большую часть возможной продолжительности дня. В летние месяцы солнце светит в среднем по 12–13 часов в сутки при минимальной облачности. Совокупная годовая суммарная солнечная радиация достигает около 1300–1800 кВт·ч/м² на горизонтальную поверхность [9]. Наиболее часто наблюдаемые ветры – преимущественно северо-восточного направления, со средней скоростью порядка 3–6 м/с. В отдельные периоды скорость ветра значительно возрастает, что требует учёта ветровой нагрузки при проектировании конструкций СЭС. Сильные ветры также усиливают перенос пыли, вызывая оседание частиц на солнечных панелях и необходимость их регулярной очистки. В целом климатические условия Кызылорды благоприятны для эффективной эксплуатации солнечной электростанции благодаря высокой инсоляции и длительному тёплому периоду, однако экстремальные температуры, ветры и пыльные бури должны быть учтены при проектировании и обслуживании оборудования.

3.5 Климатические условия Карагандинской области

Климат Карагандинской области резко континентальный: зимы очень морозные (средняя температура января около $-16...-17^{\circ}\text{C}$) и часто сопровождаются буранами, а лето жаркое и засушливое (средняя температура июля $+20...+21^{\circ}\text{C}$). В Прибалхашье (южная пустынная часть области, район озера Балхаш) климат наиболее сухой; среднегодовая температура воздуха здесь составляет порядка $+6^{\circ}\text{C}$. Амплитуда температур велика: максимумы летом достигают $+40...+45^{\circ}\text{C}$, а зимой минимумы опускаются до -40°C и ниже. Продолжительность тёплого периода (со среднесуточной температурой $>0^{\circ}\text{C}$) на юге области достигает $\sim 230-240$ дней – примерно с середины апреля до начала октября. Осадков выпадает мало. Прибалхашский район – самый засушливый: годовая сумма осадков составляет всего около $130-140$ мм. Основная часть (порядка $65-80$ мм) приходится на тёплый период (апрель–октябрь), причём летние месяцы чрезвычайно сухие (например, в сентябре в среднем ~ 3 мм осадков). Зимой осадки также невелики (преимущественно в виде снега), поэтому снежный покров тонкий и нестойкий. Регион Прибалхашья отличается высоким уровнем солнечной радиации и продолжительностью солнечного сияния. По данным климатических нормативов, в районе г. Балхаш суммарно наблюдается около 3125 часов солнечного сияния в год, что является одним из максимальных значений по стране. Это соответствует приблизительно $1300-1800$ кВт·ч солнечной энергии на 1 м^2 горизонтальной поверхности в год [9]. Ясная погода преобладает большую часть года, особенно летом, обеспечивая высокую инсоляцию – ключевой фактор для эффективной работы солнечной электростанции. Ветровой режим в регионе также существенен. Среднегодовая скорость ветра в районе Балхаша составляет $\sim 4,2$ м/с. Преобладают ветры восточных направлений (в том числе северо-восточные) на равнинных пространствах юга области. Зимой нередки сильные ветра с метелями (буран), резко понижающие видимость и создающие нагрузку на сооружения. Согласно строительным нормам, территория относится к III ветровому району, что подразумевает необходимость учитывать значительную ветровую нагрузку при проектировании конструкций СЭС.

Микроклимат Прибалхашья формируется влиянием крупного озера Балхаш и окружающих пустынных ландшафтов. Близость озера несколько смягчает экстремальные колебания температуры и повышает локальную влажность, однако в целом климат остаётся крайне континентальным и сухим. Сильные ветры способствуют переносу солёной пыли с высыхающих водоёмов, вызывая пыльные бури. Эти факторы обуславливают необходимость защиты оборудования СЭС от запыления и абразивного воздействия (ветровая эрозия), а также учёта возможного снижения генерации зимой из-за снега и инея на модулях. В целом климатические условия Карагандинской области, особенно прибалхашского района, благоприятны для эксплуатации СЭС благодаря длительному солнечному сиянию и

высокому уровню инсоляции. Возможные ограничения (пыльные бури, сильные ветры, эпизодический снежный покров) могут быть минимизированы правильными проектными решениями и соответствующей эксплуатацией [10].

Таблица 5 – Основные климатические данные исследуемых регионах

Область, пункт	ср. за год прод. солнеч. сияния, часы	DNI, кВт·ч/м ² в год	GHI, кВт·ч/м ² в год	Продол. залегания устойчивого снежного покрова, дни	Сред. число дней $T_{\text{макс.воз}} \geq 34^{\circ} \text{C}$	Минимальная из средних скоростей ветра по румбам в июле, м/с
Алматы, Конаев	2826	1544,6	1518,2	102	9,4	1,0
Кызылорда	2876	1617,3	1592,9	60	47,3	1,8
Туркестан, Кентау	3098	1760,7	1649,0	40	63,3	1,8
Тараз	2800	1672,3	1581,8	67	28,9	1,7
Балхаш	3125	1756,0	1530,9	95	6,3	3,0

Таблица 5 содержит основные климатические данные для проектирования солнечных электростанций (СЭС) в различных регионах Казахстана. Показатели приведены согласно нормативу СП РК 2.04-01-2017 и включают среднюю годовую продолжительность солнечного сияния, прямую нормальную радиацию (DNI) [17], глобальную горизонтальную радиацию (GHI), продолжительность устойчивого снежного покрова, число жарких дней (с температурой воздуха $\geq 34^{\circ} \text{C}$) и минимальную из средних скоростей ветра в июле. Данные по солнечному излучению (DNI и GHI) взяты с портала Global Solar Atlas [9], который предоставляет проверенную спутниковую информацию по солнечному потенциалу регионов. Наиболее благоприятные условия для строительства СЭС наблюдаются в южных и центральных регионах — Туркестане (Кентау), Балхаше и Кызылорде. В этих точках зафиксированы наивысшие значения солнечной радиации (DNI до 1760,7 кВт·ч/м² в год) и продолжительность солнечного сияния — до 3125 часов в год. Для сравнения, в Петропавловске среднегодовая продолжительность солнечного сияния составляет всего 2071 час, что подчёркивает значительно более высокий солнечный потенциал южных регионов страны [17].

4 Моделирование исследуемых СЭС в программном обеспечении PVsyst

В рамках исследования моделируются как стационарные системы, так и системы с одноосевыми трекерами на реальных координатах действующих СЭС Казахстана. Эффективность трекерной системы напрямую зависит от географических и климатических условий площадки, поэтому при моделировании необходимо учитывать такие параметры, как уровень инсоляции (особенно прямой солнечной радиации – DNI), средние и максимальные температуры воздуха, скорость ветра, наличие осадков и снега, а также характер рельефа и степень загрязнённости атмосферы. Учёт этих факторов позволяет выполнить корректное моделирование работы солнечных электростанций и обеспечить адекватное сравнение расчётных результатов с фактическими показателями уже действующих СЭС в Казахстане. Для этого используются специализированные программные комплексы, способные рассчитывать годовую и месячную выработку на основе почасового моделирования, учитывать потери в кабелях и инверторах, анализировать близкое и дальнее затенение и оптимизировать расположение модулей по рельефу. Наиболее востребованными решениями в отрасли являются PVsyst, pvDesign (RatedPower), HelioScope, PVcase Ground Mount, PVComplete (PVCAD / Mega) и SunDAT.

В качестве основного инструмента для детального моделирования ФЭС выбран PVsyst – комплексное решение, позволяющее задать точные координаты площадки, импортировать синтетические или фактические метеорологические данные (Meteonorm, PVGIS и др.) и сформировать поля как с фиксированной ориентацией, так и с одноосевыми трекерами (настраивая параметры оси, диапазон углов и стратегию backtracking). Встроенные библиотеки модулей и инверторов, гибкие настройки коэффициентов запыления и недоступности, почасовое прогнозирование выработки и мощные средства анализа потерь (3D-затенение, температурные эффекты, mismatch, деградация модулей, проводные потери и др.) позволяют провести детальный расчёт показателей системы, получить полные отчёты с месячной и годовой генерацией энергии, распределением потерь и ключевыми КПД-параметрами.

PVsyst признано отраслевым стандартом энергетического моделирования и финансового анализа крупных фотоэлектрических проектов. Разработанная в Университете Женевы (Швейцария), платформа широко применяется в инженерной и научно-исследовательской практике, а её расчёты регулярно используются при технико-экономическом обосновании и инвестиционной экспертизе солнечных электростанций [13]. Хотя точные данные о числе лицензий не публикуются, по данным аналитической платформы theirStack более 3200 компаний — от небольших инжиниринговых бюро до крупных EPC-подрядчиков в секторе возобновляемой энергетики — используют PVsyst в своей работе. PVsyst широко используется при проектировании солнечных электростанций различной мощности. Например,

разработчики крупных парковых СЭС в Европе, США и Азии используют PVsyst для планирования и анализа выработки. По данным технических статей и практиков, PVsyst является одним из наиболее востребованных инструментов при моделировании «промышленных» солнечных электростанций. Благодаря длительной истории развития ПО (первоначальная версия – 1992 г.) и постоянным обновлениям, модели PVsyst заслужили доверие инвесторов и проектировщиков крупных PV-проектов [4].

PVsyst обладает рядом особенностей, повышающих точность и удобство расчётов. В программе реализованы высокоточные математические модели, позволяющие учитывать 3D-затенение и другие негативные факторы с высокой степенью детализации. По утверждению разработчиков, среднее отклонение реальных показателей мощности от проектных обычно не превышает 2 %. Среди преимуществ – обширные библиотеки компонентов (включая тонкоплёночные PV), поддержка получения метеоданных для любых координат через базу Meteonorm и возможность импорта данных из сторонних источников.

PVsyst обладает гибкой системой работы с метеорологическими данными. В основе стоит интегрированный модуль Meteonorm, который содержит данные (10–30 лет средних) примерно для 1200 метеостанций по всему миру. В программе можно задать любую точку географически: по заданным координатам PVsyst получает данные либо через интерполяцию ближайших станций, либо через спутниковые источники (например, NASA-SSE). Кроме того, реализован импорт метеоисточников в различных форматах: PVsyst может загружать файлы PVGIS, NASA-SSE, SoDa/HelioClim, RETScreen, типовых метеорологических данных TMY3 (программа-сервис США) и EPW (в Канаде), а также позволяет импортировать собственные измеренные данные или другие базы через универсальный конвертер. Отдельно следует отметить поддержку PVGIS TMY 5.3. PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) является сервисом Европейской комиссии, разрабатываемым Объединённым исследовательским центром (JRC), и предназначенным для расчёта глобальной солнечной радиации и моделирования производительности фотоэлектрических систем. Начиная с версии PVsyst 8.0.7 (февраль 2025 года), в программе реализована полная совместимость с API PVGIS версии 5.3. Теперь данные PVGIS 5.3 применяются по умолчанию при импорте типовых метеорологических годов (TMY) и временных рядов, что обеспечивает прямую загрузку актуальных TMY-файлов с улучшенными моделями атмосферной прозрачности, учётом влияния рельефа местности и более высокой точностью исходных климатических параметров [13]. Таким образом, PVsyst обеспечивает доступ к современным и максимально точным метеоданным практически для любой географической локации, что является критически важным при проектировании крупных солнечных электростанций и анализе их экономической рентабельности. Данная программа широко используется в различных сферах проектирования и аналитики солнечных систем. С одной

стороны, PVsyst активно применяется в научно-исследовательской и образовательной деятельности, поскольку разработчики нацеливают программное обеспечение на «потребности архитекторов, инженеров, исследователей», а также отмечают его «высокую полезность для учебных целей». С другой стороны, благодаря возможности детального расчёта выработки электроэнергии, оценки потерь и анализа экономики проектов, PVsyst стал неотъемлемой частью профессионального инструментария инженеров и проектировщиков при реализации крупных коммерческих солнечных электростанций. Сообщество инвесторов и владельцев таких объектов уже во многом стандартизировало свои подходы, опираясь на расчётные модели PVsyst. Основные технические решения, финансовое обоснование, а также проектная документация и сертификаты часто оформляются именно на основании отчётов, подготовленных в PVsyst. Высокий уровень доверия к его расчётам подтверждается регулярным применением PVsyst в качестве обязательного или рекомендованного инструмента при проведении коммерческих тендеров и аукционов в отрасли солнечной энергетики.

4.1 Моделирование СЭС-1 с трекерной системой в Туркестанской области в среде PVsyst

Для проведения моделирования были выбраны реальные солнечные электростанции, расположенные в различных регионах Казахстана. Моделирование выполнялось для двух конструкций: со стационарным креплением и с трекерной системой. В целях обеспечения объективного сравнительного анализа для всех объектов были приняты одинаковые технические параметры (установленная мощность, конфигурация инверторов и другие характеристики). Исключение составил только тип фотоэлектрических модулей — он подбирался в соответствии с фактическими данными, используемыми на действующих объектах. Такой подход обеспечивает реалистичность моделирования и позволяет достоверно оценить влияние типа конструкции на эффективность генерации электроэнергии.

Процесс моделирования фотоэлектрических систем в PVsyst организован в несколько последовательных этапов, обеспечивающих системный подход и детальный анализ проектируемой солнечной электростанции [13]. На первом этапе моделирования в программном обеспечении PVsyst осуществляется задание координат проектируемого объекта и его высоты над уровнем моря, после чего автоматически подгружаются метеорологические данные, соответствующие выбранной географической точке. На этом этапе также осуществляется выбор точного местоположения солнечной электростанции СЭС-1 (Туркестанская область) и соответствующей базы метеоданных [21]. Для этого используется доступ к признанным климатическим базам данных, таким как PVGIS, Meteonorm или

собственные измерения. В данном исследовании использовались метеоданные PVGIS TMY 5.3, так как они наилучшим образом соответствуют фактическим климатическим условиям в районе расположения исследуемых солнечных электростанций.

Таблица 6 – Основные технические характеристики для проектирования солнечной электростанции СЭС-1 с трекерной системой в Туркестанской области

Наименование и технические характеристики оборудования	Количество
Солнечные модули, RSM72-6-330-P, 330 Вт, поликристалл	151200 шт.
Инверторы, Huawei, SUN-2000-185KTL-H1, 175 кВт	303 шт.
Количество рядов (трекер системы)	1800 шт.
Расстояние между рядами	5 м
Количество солнечных модулей в одном ряду	84 шт.
PV Кабель, средняя длина стринга, 4 мм ²	60м
Кабель для АС 800, средняя длина между инвертором и трансформатором, 120 мм ²	100 м
Трансформатор 800/35 кВ, 3150 кВА	13 шт.
Средняя длина кабеля между трансформаторами, 120 мм ²	1850 м
Главный трансформатор, 35/110 кВ, 50 000 кВА	1 шт.
Средняя мощность на собственные нужды станции	10 кВт

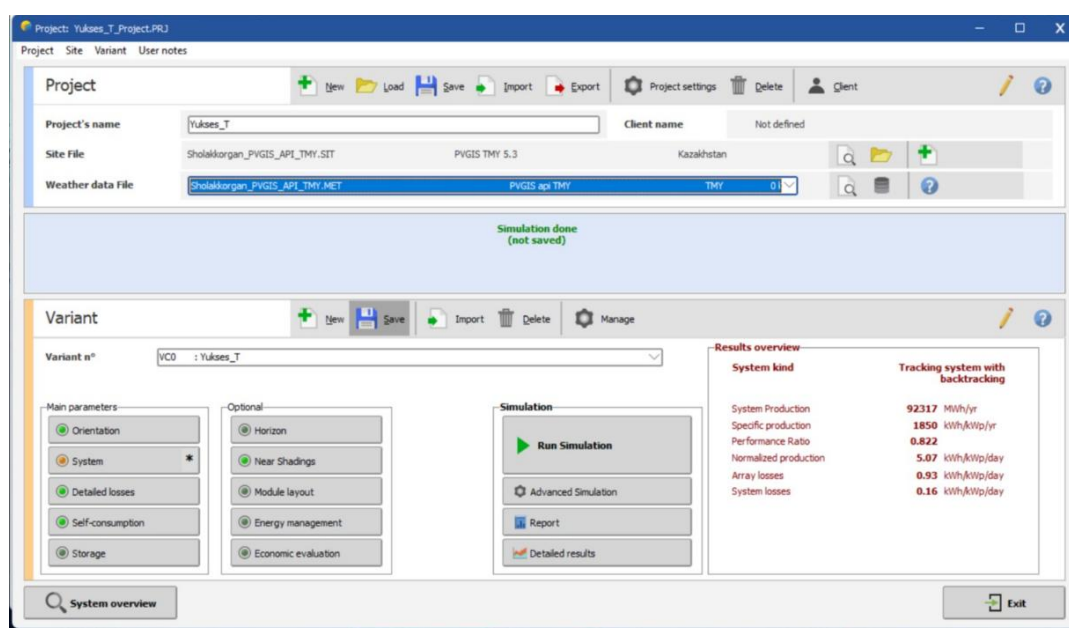


Рисунок 15 – Главное окно программного обеспечения PVsyst

Главное окно PVsyst содержит функциональные блоки, позволяющие настраивать ключевые параметры проекта: ориентацию фотоэлектрических модулей, энергетические потери, влияние затенений, экономические показатели и другие характеристики. В правой части интерфейса отображаются расчётные показатели эффективности системы, включая годовую и удельную генерацию электроэнергии, коэффициент производительности (PR), нормализованную выработку, а также потери на уровне модулей и всей системы в целом.

На втором этапе моделирования осуществляется выбор типа и ориентации фотоэлектрических модулей [13]. В данном окне задаются параметры стационарной или трекерной конфигурации, направление оси вращения, предельные углы поворота (ϕ min/max), угол наклона оси, а также активируется функция автоматического предотвращения взаимного затенения панелей (backtracking). Кроме того, задаются параметры взаимного расположения трекеров: межрядное расстояние (pitch), длина солнечного модуля, коэффициент заполняемости площади (GCR). На рисунке 16 представлено меню выбора ориентации модулей в среде PVsyst, где указано, что используется горизонтальная одноосевая трекерная система с направлением по оси «север–юг» и алгоритмом backtracking.

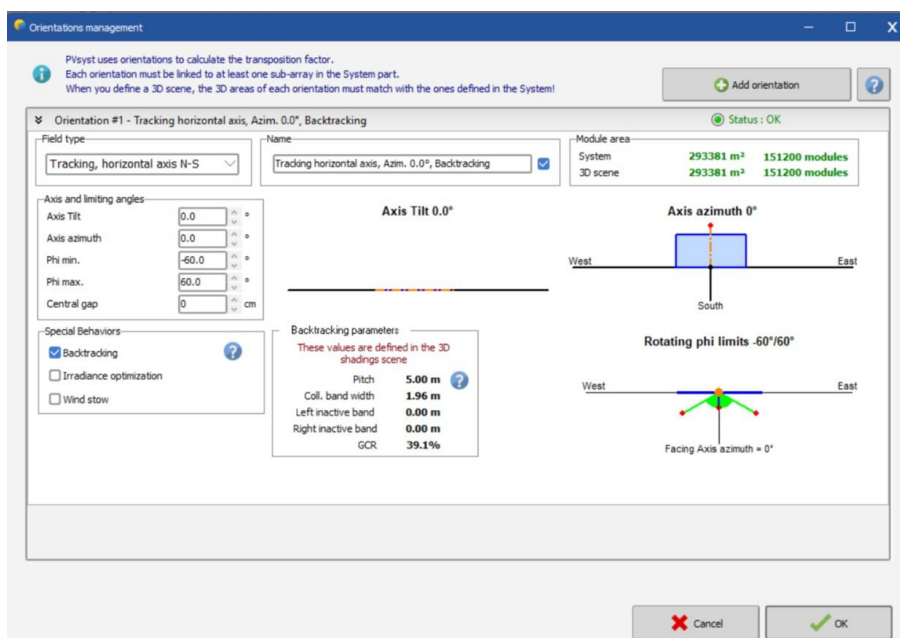


Рисунок 16 – Меню выбора ориентации модулей в программе PVsyst

На третьем этапе осуществляется выбор основного оборудования из встроенных библиотек PVsyst, включая фотоэлектрические модули, инверторы и другие элементы системы. Определяется количество последовательно соединённых модулей в одной строке, а также общее число стрингов в массиве. Программа автоматически проверяет соответствие рабочих параметров системы допустимым диапазонам, включая напряжение

при экстремальных температурных условиях. В случае превышения или выхода за пределы допустимых значений, а также при несоответствии мощности инверторов расчётной нагрузке, отображаются предупреждения, позволяющие своевременно скорректировать конфигурацию системы.

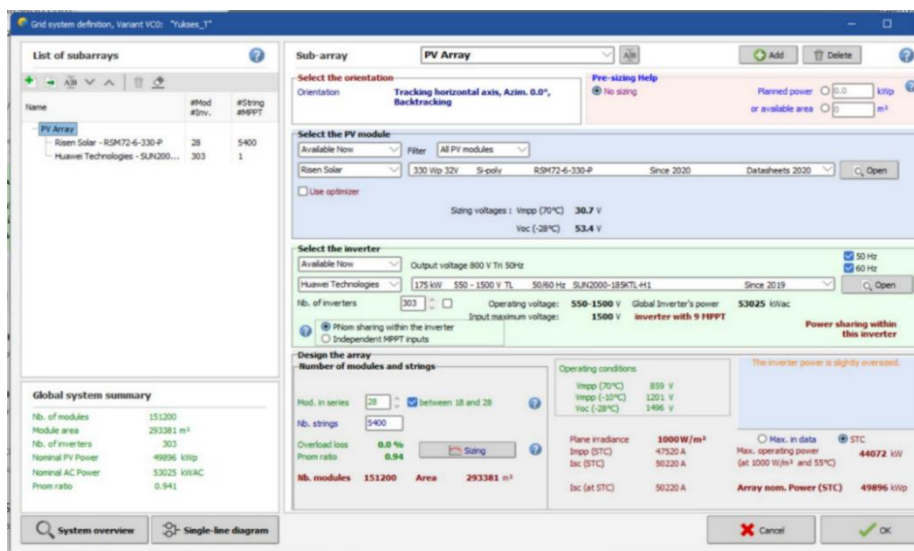


Рисунок 17 – Конфигурация оборудования системы в программе PVsyst

На четвёртом этапе моделирования в PVsyst формируется трёхмерная модель солнечной электростанции в модуле построения сцены затенения (Shading Scene Construction). При создании 3D-модели необходимо учитывать точное количество солнечных модулей, конфигурацию строк (стрингов), углы наклона и азимутальной ориентации, предельные углы поворота трекерной системы, расстояние между рядами панелей, а также общую геометрию размещения оборудования на участке [13]. Корректное задание этих параметров позволяет точно смоделировать условия затенения и применить алгоритм backtracking для минимизации потерь энергии от взаимного затенения.

На рисунке 19 представлена визуализация 3D-сцены с размещением трекерных рядов, ориентированных в направлении восток – запад и равномерно распределённых по всей площади участка. СЭС-1 состоит из 151 200 поликристаллических солнечных панелей, разделённых на 13 блоков. На каждом блоке установлено 36 (или 32) отдельных подвижных трекерных систем. Каждая трекерная система состоит из 84 солнечных панелей, разделённых на 3 стринга. Расстояние между трекерными системами составляет 5 метров. Трекерные системы работают по алгоритму backtracking. Угол поворота по азимуту — 0 градусов.

На пятом этапе моделирования в программе PVsyst, в разделе Detailed Losses, задаются значения потерь, возникающих на различных этапах преобразования и передачи энергии в фотоэлектрической системе. В первую очередь учитываются температурные потери, которые зависят от

климатических условий региона, а также от способа установки модулей — на крыше здания или на земле в открытом пространстве.

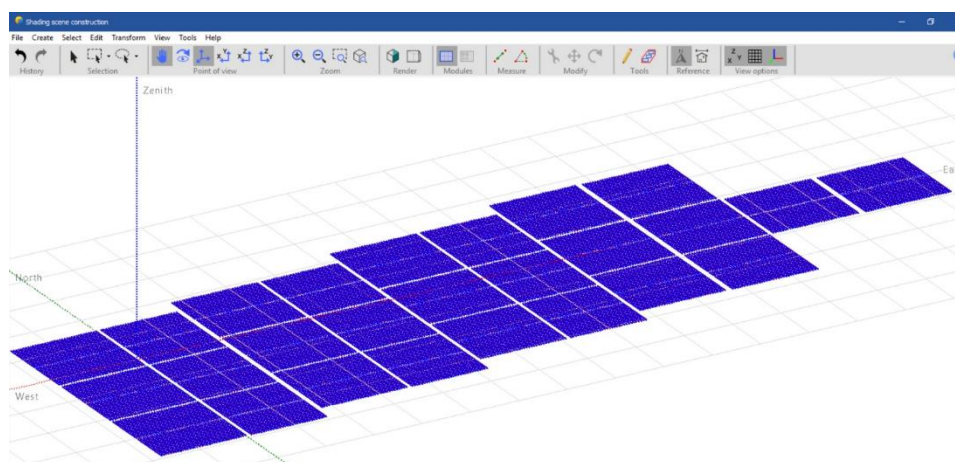


Рисунок 18 – 3D-модель СЭС-1 с трекерной системой в PVsyst

Расчёт температурных потерь солнечных модулей для ввода исходных данных в программу PVsyst:

$$U = U_c + U_v * V_w \quad (3)$$

Для расчёта температурных потерь применяются константы: температурная $U_c = 29 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ и ветровая $U_v = 0 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К} \cdot (\text{м/с})$. Последняя задаётся равной нулю в соответствии с рекомендациями PVsyst, поскольку скорость ветра является переменной величиной, и её прямое включение в расчёт может привести к недостоверным результатам. При задании этих значений программа автоматически рассчитывает температурные потери, используя метеорологические данные, соответствующие конкретной географической локации [13].

Кроме температурных, в системе учитываются и электрические потери в кабелях постоянного и переменного тока. Эти потери определяются их длиной, типом прокладки, материалом и сечением проводника. Далее задаются потери на преобразование энергии в инверторах и трансформаторах, а также потери от загрязнения поверхности модулей (Soiling losses), которые зависят от региона, частоты осадков и уровня пылевых загрязнений. В северных и горных районах дополнительное внимание уделяется учёту потерь от снежных отложений, поскольку снежный покров может значительно снижать уровень поступающей солнечной радиации на модули в зимний период. Также программа позволяет учитывать потери от частичного затенения (shading), неоднородности характеристик модулей (mismatch losses), а также потребление электроэнергии на собственные нужды станции (auxiliary losses), включающее питание систем мониторинга, охраны, освещения, систем трекинга и охлаждения [13].

Таблица 7 — Отчёт с помесечной детализацией за январь–июнь 2024 года по солнечной электростанции СЭС-1.

Энергопоказатели/ месяцы	1	2	3	4	5	6
Потенциальная генерация, млн.кВт·час	2,95	4,96	7,81	11,53	13,01	16,23
Фактическая генерация с учетом потерь, млн.кВт·час	1,62	4,22	6,72	9,61	10,69	12,56
Доля полезной энергии (PR),%	55,0	85,1	86,0	83,3	82,2	77,4
Технические потери, %	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6
Потери от неисправ. тр. системы и энергопотребления её приводов. %	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Потери от снега, загрязнения и по температуре, %	32,4	2,3	1,4	4,1	5,2	10,0

Таблица 8 — Отчёт с помесечной детализацией за июль-декабрь 2024 года по солнечной электростанции СЭС-1.

Энергопоказатели/ месяцы	7	8	9	10	11	12	за год
Потенциальная генерация, млн.кВт·час	14,97	14,28	10,86	6,63	3,59	3,03	10,99
Фактическая генерация с учетом потерь, млн.кВт·час	11,780	11,07	8,77	5,46	3,07	2,17	8,78
PR, %	78,8	77,6	80,8	82,2	85,3	71,4	79,9
Тех. потери, %	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6
Потери от неисправ. тр. системы и энергопотребления её приводов. %	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Потери от снега, загрязнения и по температуре, %	8,6	9,8	6,6	5,2	2,1	16,0	8,6

Таблицы 7 и 8 содержат расчёт потенциальной и фактической выработки электроэнергии до трансформаторов среднего напряжения, а также

совокупных потерь в рамках годового отчёта с помесечной разбивкой для солнечной электростанции СЭС-1.

Для проектирования солнечных электростанций в Туркестанской области используется годовой отчёт реальной станции СЭС-1, расположенной в данном регионе. Таблица 7 отражает потенциальную и фактическую выработку электроэнергии за 2024 год, а также доли технических потерь, включая потери от загрязнения и снежного покрытия на солнечных панелях совместно с температурными потерями. Учёт автоматического расчёта температурных потерь программой PVsyst позволяет более точно выделить долю потерь, обусловленных именно загрязнением и наличием снежного покрова на поверхности фотоэлектрических модулей.

Таким образом, все значения потерь подбираются на основе климатических данных местности, характеристик установленного оборудования и проектных решений, что позволяет обеспечить высокую точность оценки годовой выработки электроэнергии и объективную оценку эффективности проектируемой фотоэлектрической установки.

После внесения нужных технических параметров, в числе коэффициентов потерь, осуществляется построение модели и запуск симуляции проекта в программе PVsyst. В результате формируются среднегодовые отчёты, содержащие необходимые данные: прогноз годовой выработки, уровни инсоляции и диаграммы всех потерь. Полученные результаты служат основой для сравнения различных конфигураций системы — в частности, стационарной и трекерной конструкций — в условиях конкретного региона. Дополнительно, такая детализация потерь позволяет учитывать сезонные особенности, включая влияние снежного покрова зимой и пылевых загрязнений в засушливый период, что критически важно для южных областей Казахстана. Итоговые значения выработки и коэффициента производительности (PR) отражают совокупное влияние всех факторов и позволяют обоснованно принимать технические и экономические решения на этапе проектирования.

Диаграмма потерь (Loss Diagram) представляет годовое моделирование в PVsyst для солнечной электростанции «СЭС-1» с трекерной системой в Туркестанской области, отражая поэтапные энергетические потери от поступающего солнечного излучения до полезной энергии, поданной в сеть. Глобальное горизонтальное излучение составляет $1663,1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$, а благодаря системе слежения глобальное излучение в плоскости модуля увеличивается до $2249,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ (+35,3%). На этапе солнечной радиации учитываются потери от затенения (2,0%), загрязнения и снежного покрова (3,4%), а также угловых потерь (IAM – 1,2%). Далее происходят потери при преобразовании в электрическую энергию: снижение эффективности из-за нагрева панелей (4,6%), деградации (LID), разбалансировки модулей, омических потерь на DC-кабелях (в сумме около 4%). На уровне инвертора фиксируется потеря мощности 1,6% при преобразовании постоянного тока в переменный.

Дополнительные потери возникают в трансформаторах и на кабельных линиях (около 2%).

Диаграмма потерь годовой выработки «СЭС-1» с трековой системой, полученная в результате моделирования в PVsyst, представлена на рисунке 19.

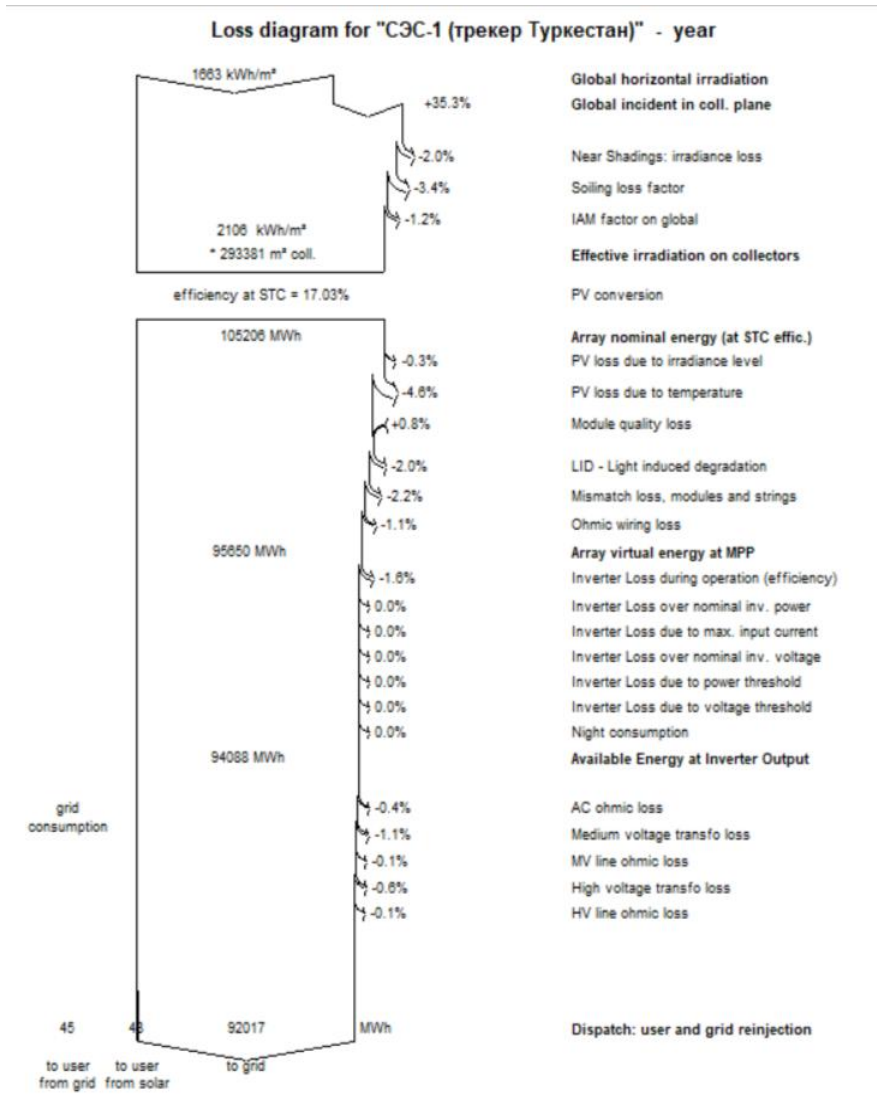


Рисунок 19 – Диаграмма потерь годовой выработки СЭС-1 с трековой системой (Туркестанская область) по результатам моделирования в PVsyst

Таблица 9 представляет собой годовой отчёт, полученный в результате моделирования в программе PVsyst для СЭС с трековой системой. В таблице приведены основные метеорологические и энергетические параметры по месяцам: глобальная горизонтальная радиация (GlobHor), диффузная радиация (DiffHor), средняя температура окружающей среды (T_Amb), инцидентное и эффективное излучение на поверхность модулей (GlobInc и GlobEff), а также результаты расчёта выработки энергии на уровне массива (EArray), на уровне пользователя (E_User), потерь на инверторе (E_Solar), отпуск в сеть (E_Grid) и потерь на трансформации и передаче (EFrGrid).

Таблица 9 – Годовой отчёт моделирования солнечной электростанции СЭС-1 с трекерной системой в программе PVsyst.

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_User MWh	E_Solar MWh	E_Grid MWh	EFrGrid MWh
January	54.1	29.48	-5.64	70.2	59.0	3015	7.4	2.7	2883	4.7
February	90.2	36.94	-10.36	122.8	106.5	5485	6.7	2.8	5288	3.9
March	146.6	39.39	9.37	202.7	194.5	9094	7.4	3.5	8755	3.9
April	140.3	57.58	10.23	181.5	173.7	8132	7.2	3.8	7829	3.4
May	203.0	61.70	20.86	268.4	256.4	11383	7.4	4.4	10957	3.1
June	222.2	58.85	27.33	294.0	275.6	11854	7.2	4.5	11407	2.7
July	235.4	50.28	28.48	320.5	300.8	12846	7.4	4.5	12358	2.9
August	199.8	47.59	25.79	274.1	256.8	11155	7.4	4.1	10735	3.3
September	160.6	37.33	18.08	224.9	214.5	9690	7.2	3.5	9327	3.6
October	98.3	36.50	11.76	133.8	127.2	5988	7.4	3.3	5762	4.2
November	63.4	23.26	4.34	89.6	83.8	4107	7.2	2.7	3947	4.5
December	49.2	22.12	-4.35	67.1	56.8	2901	7.4	2.7	2771	4.8
Year	1663.1	501.02	11.46	2249.5	2105.7	95650	87.6	42.5	92017	45.1

По результатам годового моделирования солнечной электростанции мощностью 50МВт с трекерной системой с функцией backtracking, получены высокие показатели эффективности. Удельная выработка составила 1845 кВт·ч/кВт·пик, а коэффициент производительности (PR) — 82,0%, что указывает на высокую степень соответствия проектных и фактических условий эксплуатации. Годовые итоги показывают общее поступление солнечной радиации на плоскость модулей в размере 2249,5 кВт·ч/м², из которых эффективно было использовано 2105,7 кВт·ч/м², что обеспечило генерацию массива в 95 650 МВт·ч и передачу в сеть 92 017 МВт·ч.

4.2 Моделирование солнечной электростанции СЭС-1 со стационарной системой в Туркестанской области в программной среде PVsyst

Для оценки эффективности применения трекерных систем солнечных электростанций было проведено моделирование электростанций с двумя типами конструкций: стационарной и трекерной системой. В рамках исследования будет осуществлено сравнение результатов моделирования с фактическими данными работы солнечных электростанций, расположенных в соответствующих климатических условиях. Для корректного и объективного сравнительного анализа были приняты идентичные технические характеристики для всех рассматриваемых электростанций, за исключением типа применяемых солнечных модулей. На электростанции СЭС-1, расположенной в Карагандинской области, а также на станциях СЭС-2 и СЭС-3 в Туркестанской области использовались двухсторонние монокристаллические солнечные панели. На остальных моделируемых объектах были применены односторонние поликристаллические панели. Для

подготовки 3D-модели в среде PVsyst требуется определить тип конструкции и расстояние между рядами солнечных панелей [13].

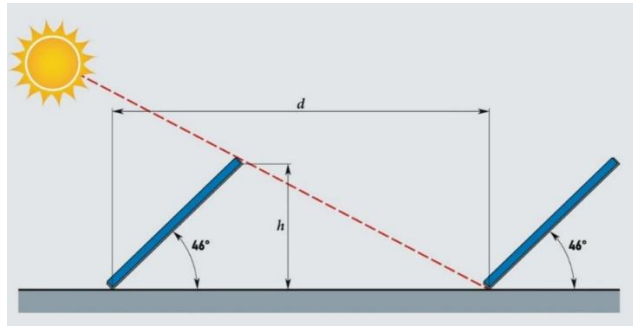


Рисунок 20 – Схема определения оптимального расстояния между рядами солнечных панелей

Расстояние между рядами определяется по упрощённой эмпирической формуле [24]:

$$d = 3(h+a) \quad (4)$$

$$h = L \cdot \sin \alpha \quad (5)$$

где h — высота затеняющего края панели,
 d — минимальное расстояние для исключения затенения в зимний период,

L — длина панели (по наклонной),

α — угол наклона панели от горизонтали,

a — высота нижнего края панели (фронтальной части конструкции) над уровнем земли, $a \approx 1$ м.

$$d = 3 \cdot (L \cdot \sin \alpha + a) = 3 \cdot (4 \cdot \sin 39^\circ + 1) = 10,55 \text{ м.}$$

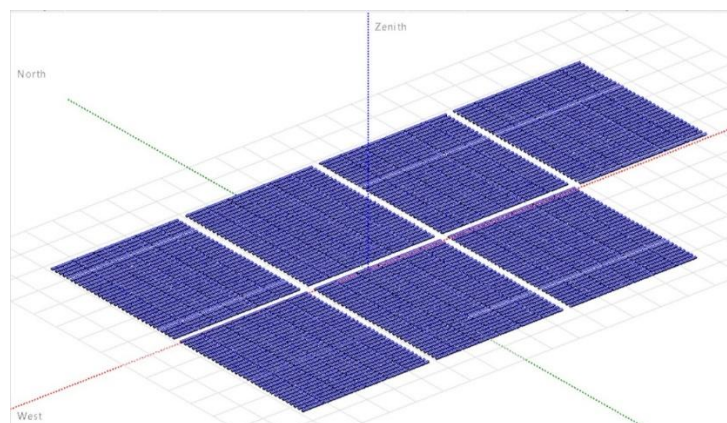


Рисунок 21 – 3D-модель СЭС-1 со стационарной системой в PVsyst

В рамках проектирования солнечной электростанции СЭС-1 со стационарной системой в Туркестанской области была реализована модель, включающая 151 200 поликристаллических модулей, разделённых на 7 блоков. Панели ориентированы строго на юг, с азимутом 0° , что соответствует оптимальному положению для максимального годового поглощения солнечной радиации. В каждом ряду установлено по 56 модулей, смонтированных в два вертикальных ряда (2V). На основе рекомендаций программного обеспечения PVsyst для данного региона был выбран угол наклона 39° , как наиболее эффективный в годовом балансе генерации. Для предотвращения затенения между рядами в период низкого солнечного стояния, расстояние между рядами было определено по формулам (4-5) и составило 10,55 метров.

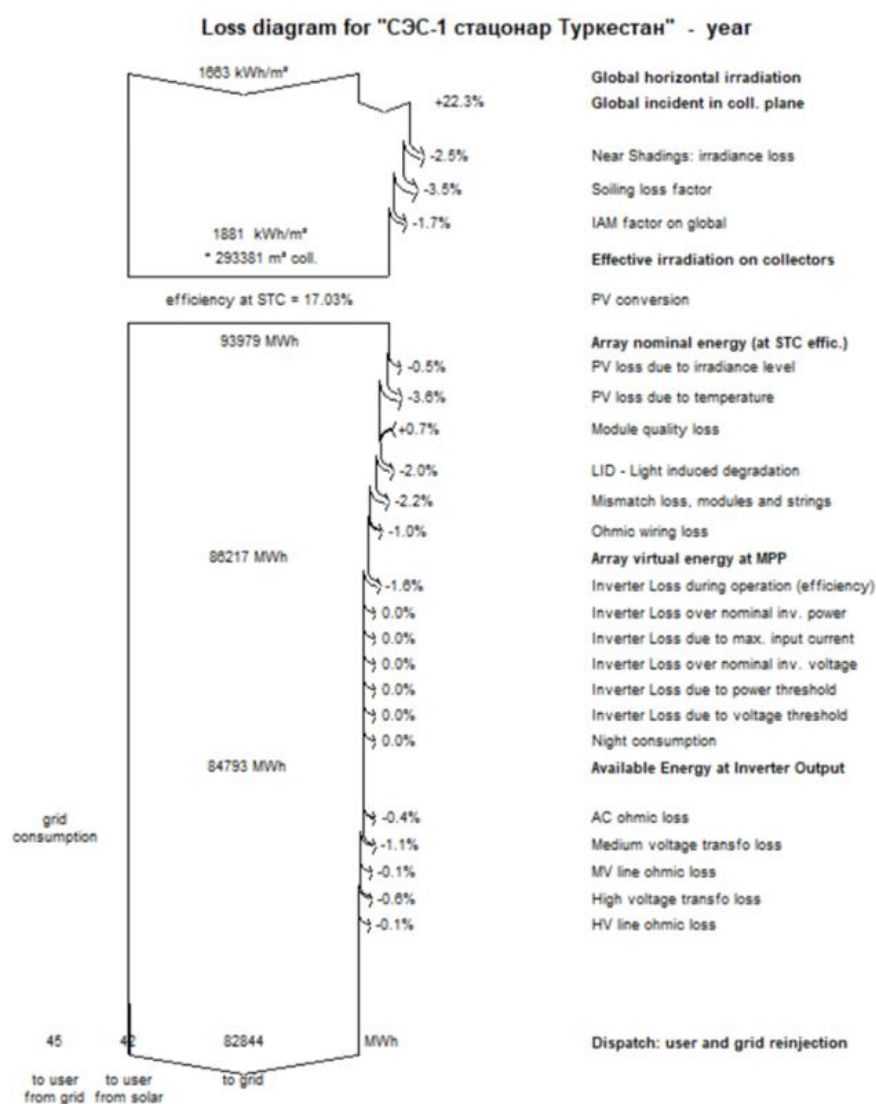


Рисунок 22 – Диаграмма потерь годовой выработки СЭС-1 со стационарной системой по результатам моделирования в PVsyst

Перед проведением анализа энергетических потерь необходимо корректно задать все параметры моделирования, включая технические характеристики оборудования, климатические данные и коэффициенты потерь. После настройки всех параметров запускаем симуляцию и получаем все необходимые годовые прогнозные данные. На рисунке 22 представлено окно годовых энергетических потерь, полученное в результате моделирования стационарной солнечной установки.

Таблица 10 – Годовой отчет моделирования солнечной электростанции СЭС-1 со стационарной системой в программе PVsyst

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_User MWh	E_Solar MWh	E_Grid MWh	EFrGrid MWh
January	54.1	29.48	-5.64	94.4	81.4	4120	7.4	2.7	3949	4.8
February	90.2	36.94	-10.36	145.3	127.5	6487	6.7	2.8	6243	3.9
March	146.6	39.39	9.37	202.1	193.0	8922	7.4	3.5	8572	3.9
April	140.3	57.58	10.23	156.7	147.8	6908	7.2	3.8	6641	3.4
May	203.0	61.70	20.86	203.5	189.9	8453	7.4	4.3	8126	3.1
June	222.2	58.85	27.33	209.7	191.3	8275	7.2	4.5	7952	2.7
July	235.4	50.28	28.48	226.6	207.0	8894	7.4	4.5	8547	2.9
August	199.8	47.59	25.79	216.3	198.7	8626	7.4	4.1	8289	3.4
September	160.6	37.33	18.08	208.8	197.3	8835	7.2	3.5	8490	3.7
October	98.3	36.50	11.76	149.7	143.3	6653	7.4	3.3	6392	4.2
November	63.4	23.26	4.34	122.5	117.2	5661	7.2	2.7	5441	4.5
December	49.2	22.12	-4.35	99.1	86.6	4385	7.4	2.6	4203	4.8
Year	1663.1	501.02	11.46	2034.6	1881.0	86217	87.6	42.3	82844	45.3

Годовой отчет моделирования в PVsyst для СЭС-1 со стационарной установкой показывает поступление инсоляции в плоскости модулей на уровне 2034,6 кВт·ч/м², эффективное использование — 1881 кВт·ч/м², валовую генерацию массива — 86 217 МВт·ч и отпуск в сеть — 82 844 МВт·ч. Для сравнения, в модели СЭС с трекерной системой инсоляция достигает 2249,5 кВт·ч/м², эффективное использование — 2105,7 кВт·ч/м², генерация — 95 650 МВт·ч, а отпуск в сеть — 92 017 МВт·ч.

Согласно данным диаграммы, потери от затенения у стационарной системы составляют на 0,5% больше, чем у трекерной установки. Это обусловлено фиксированным положением модулей, при котором сохраняется риск частичного затенения в утренние и вечерние часы. В то же время, увеличенное расстояние между рядами в стационарной конфигурации способствует улучшенной вентиляции модулей, что, в свою очередь, приводит к снижению температурных потерь на 1% по сравнению с трекерной системой.

Таким образом, наблюдается взаимная компенсация различных типов потерь, обусловленная особенностями конструктивного исполнения систем. Эти данные позволяют предварительно оценить различия в производительности между двумя конфигурациями, однако окончательные выводы о целесообразности применения трекеров требуют учета капитальных и эксплуатационных затрат (CAPEX и OPEX), а также расчета экономической эффективности [28].

4.3 Сравнительный анализ результатов моделирования СЭС в исследуемых регионах с фактическими данными реальных электростанций

Эффективность солнечных электростанций определяем следующими параметрами:

1) Коэффициент производительности (Performance Ratio, PR) – безразмерный показатель, характеризующий отношение фактической выработки энергии фотоэлектростанции к теоретически возможной при идеальных условиях. Проще говоря, это доля от «идеальной» выработки (при стандартной инсоляции 1000 Вт/м^2 и температуре ячейки 25°C). Например, в стандарте IEC 61724 PR определяется как отношение измеренного выхода к ожидаемому (расчётному) выходу системы за отчётный период [26].

Коэффициент производительности:

$$PR = \frac{E_{\text{факт}}}{P_{\text{н}} \times G_{\text{inc}}} \quad (6)$$

где $E_{\text{факт}}$ — фактическая годовая выработка ($\text{кВт}\cdot\text{ч}$),

$P_{\text{н}}$ — установленная мощность (кВт),

G_{inc} — суммарная инсоляция на плоскости модулей за период ($\text{кВт}\cdot\text{ч/м}^2$).

PR учитывает все основные потери – оптические (затенения, угловые потери, загрязнения), потери в модулях (конверсия, температурные, несовместимость и т.д.) и потери системы (КПД инвертора, режим работы). Благодаря этому PR позволяет оценивать качество реализации СЭС и сравнивать её эффективность независимо от условий освещённости: он мало зависит от ориентации и уровня инсоляции.

2) Удельная выработка (Specific Production) – это количество электроэнергии, произведённой солнечной электростанцией за определённый период (обычно год), отнесённое к единице установленной мощности станции. Измеряется в $\text{кВт}\cdot\text{ч}$ на 1 кВт_p номинальной мощности ($\text{кВт}\cdot\text{ч/кВт}_p$). Данный показатель отражает эффективность использования солнечного ресурса (инсоляции) в конкретном регионе и является удобным критерием для сравнения производительности солнечных электростанций различных размеров и конфигураций. Чем выше значение удельной выработки, тем выше считается солнечный потенциал региона и эффективность работы станции.

$$\text{Specific Production} = \frac{E_{\text{факт}}}{P_{\text{н}}} \quad (7)$$

где $E_{\text{факт}}$ — фактическая годовая выработка ($\text{кВт}\cdot\text{ч}$),

$P_{\text{н}}$ - установленная мощность (кВт).

Для оценки эффективности работы солнечной электростанции важными параметрами являются инсоляция на наклонную поверхность модулей (GlobInc) и климатические характеристики региона [26]. Параметр GlobInc отражает общий энергетический потенциал местности и определяет доступный солнечный ресурс без учёта внешних потерь. Вместе с тем, на производительность станции существенно влияют климатические факторы, такие как температура окружающей среды, которая определяет температурный режим модулей и их эффективность, а также скорость ветра, влияющая на естественное охлаждение модулей и, соответственно, на величину температурных потерь. Помимо этого, учитываются продолжительность солнечного сияния, количество осадков и частота выпадения снега, что оказывает влияние на уровень загрязнения и затенения модулей. Совокупность указанных факторов позволяет более точно и объективно оценивать реальную эффективность эксплуатации солнечных электростанций.

В ходе исследования было проведено моделирование солнечных электростанций с использованием климатических данных для пяти регионов Казахстана: Алматинской, Жамбылской, Карагандинской, Кызылординской и Туркестанской областей. В качестве координат для расчётов выбраны геолокации реально действующих объектов, что обеспечило сопоставимость условий моделирования с фактической эксплуатацией станций. Для каждой области выполнено моделирование двух типов конструкций — со стационарным креплением модулей и системой одноосного слежения (трекерной системой с функцией backtracking). Такой подход позволил оценить влияние конструктивного исполнения станций на ключевые энергетические показатели, выявить региональные закономерности, связанные с климатическими особенностями местности, и провести достоверный сравнительный анализ расчётных данных с реальной генерацией существующих СЭС.

В приведённой ниже таблице 10 отражены результаты моделирования в программе PVsyst солнечных электростанций мощностью 50 МВт с фиксированной (стационарной) установкой, выполненного по координатам действующих СЭС на территории Казахстана. Модельные расчёты проводились с учётом реальных климатических условий и идентичной конфигурации межрядного расстояния, угла наклона и ориентации модулей. Особенностью ряда объектов является использование различных типов фотомодулей: на большинстве станций установлены поликристаллические модули (P), тогда как на СЭС-2 и СЭС-3 в Туркестанской области, а также на СЭС-1 в Карагандинской области применяются двухсторонние монокристаллические модули (2M), что оказывает прямое влияние на показатели выработки и эффективность системы.

Таблица 11 - Результаты моделирования в PVsyst солнечных электростанций мощностью 50 МВт со стационарной установкой, выполненного по координатам действующих СЭС на территории Казахстана.

СЭС	Тип модуля	Годовая выработка, (млн. кВт·час)	GlobInc, кВт·час/м ²	PR	Specific prod. (кВт·час/кВтп)	Temp. Losses, (%)	Soling losses, (%)	IAM losses, (%)	Shading losses, (%)
Туркестанская область									
СЭС-1	P	82,886	2034,6	0,816	1661	3,6	3,5	1,7	2,5
СЭС-2	2M	83,988	2057,9	0,817	1681	3,9	3,1	1,4	3,0
СЭС-3	2M	84,018	2058,7	0,817	1681	3,9	3,1	1,4	3,0
СЭС-4	P	84,093	2084,8	0,808	1685	5,1	3,1	1,7	2,4
Кызылординская область									
СЭС-1	P	83,280	2061,3	0,810	1669	4,2	3,8	1,7	2,4
Карагандинская область									
СЭС-1	2M	85,083	2039,6	0,835	1702	1,5	3,0	1,4	3,2
СЭС-2	P	76,328	1826,7	0,837	1530	0,9	3,5	1,8	2,7
Алматинская область									
СЭС-1	P	82,428	2018,2	0,819	1652	3,5	3,4	1,8	2,5
Жамбылская область									
СЭС-1/2	P	81,144	1955,9	0,831	1626	1,7	3,6	1,7	2,6
СЭС-3	P	79,769	1942,5	0,823	1599	2,7	3,5	1,7	2,5

С учётом климатического разнообразия регионов, результаты демонстрируют значительную вариативность параметров. Так, солнечное излучение, поступающее в плоскости солнечных модулей (GlobInc) варьируются от 1826,7 до 2084,8 кВт·ч/м², что отражает различия в солнечном потенциале. Наивысшие уровни инсоляции зафиксированы в южных регионах — Туркестанской и Кызылординской областях, где инсоляция максимальна в течение года. Удельная выработка (Specific production) находится в диапазоне 1530–1702 кВт·ч/кВт·пик. Интересно отметить, что наивысшее значение зафиксировано на СЭС-1 в Карагандинской области, несмотря на умеренный уровень инсоляции. Это объясняется применением двухсторонних модулей и минимальными потерями от нагрева и затенения в более прохладных климатических условиях. Коэффициент производительности (PR) варьируется в пределах 81,0–83,7%, что соответствует мировым стандартам для хорошо оптимизированных установок. Повышенные значения PR наблюдаются на объектах с меньшими системными потерями, эффективной конфигурацией и использованием более современных типов панелей.

Температурные потери (Temp. losses) демонстрируют устойчивую зависимость от климатических условий: в южных регионах они достигают 4,2% (Кызылординская область), тогда как в центральных и северных, например в Карагандинской области, опускаются до 0,9%. Это подтверждает значимость климатической зоны при расчёте энергетических потерь. Потери от загрязнения (Soiling losses) варьируются от 3,1 до 3,7%, и включают в себя как пыль, так и зимние потери от снежного покрова, что особенно актуально для северных и возвышенных регионов. Потери, обусловленные углом падения солнечных лучей (IAM losses), составляют 1,4–1,7% и зависят от оптических характеристик используемых модулей. Потери от затенения (Shading losses) находятся в пределах 2,4–3,0%. Несмотря на одинаковую геометрическую конфигурацию и равное расстояние между рядами на всех объектах, различия в этих потерях объясняются географическими особенностями, включая угол солнечного пути и высоту солнца над горизонтом, особенно в зимний период. В северных регионах более низкий угол падения солнечных лучей приводит к удлинённым теням, увеличивая уровень затенения.

Таблица 12 - Результаты моделирования в PVsyst солнечных электростанций мощностью 50 МВт с трековой установкой, выполненного по координатам действующих СЭС на территории Казахстана.

СЭС	Тип модуля	Годовая выработка, (млн. кВт·час)	GlobInc, кВт·час/м²	PR	Specific prod. (кВт·час/кВтр)	Temp. Losses, (%)	Soiling losses, (%)	IAM losses, (%)	Shading losses, (%)
Туркестанская область									
СЭС-1	P	92,060	2249,5	0,820	1845	4,6	3,4	1,2	2,0
СЭС-2	2M	98,350	2388,8	0,824	1967	4,7	3,0	0,9	1,6
СЭС-3	2M	98,320	2389,4	0,823	1967	4,7	3,0	0,9	1,6
СЭС-4	P	93,652	2317,1	0,810	1877	6,0	3,2	1,1	2,0
Кызылординская область									
СЭС-1	P	92,275	2274,3	0,813	1849	5,1	3,8	1,2	2,0
Карагандинская область									
СЭС-1	2M	98,363	2335,3	0,842	1967	2,4	3,0	1,0	1,6
СЭС-2	P	82,784	1972,3	0,841	1659	1,8	3,3	1,4	2,2
Алматинская область									
СЭС-1	P	90,622	2194,6	0,828	1816	4,2	2,8	1,2	2,0
Жамбылская область									
СЭС-1/2	P	88,570	2117,7	0,838	1775	2,4	3,3	1,3	2,1
СЭС-3	P	88,307	2132,7	0,830	1771	3,4	3,2	1,2	2,1

Таблица 13 – Фактическая годовая выработка электроэнергии за 2024 год на солнечных электростанциях мощностью 50 МВт в исследуемых областях Казахстана (по данным Министерства энергетики РК)

Объект СЭС	Регион, область	Конструкция	Выработка электроэнергии в 2024 году, (млн. кВт·ч)				
			I кв.	II кв.	III кв.	IV кв.	Годовая
СЭС -1	Жамбылская	Стац.	13,22	23,97	26,26	13,56	77,01
СЭС-2	Жамбылская	Стац.	11,34	24,11	25,44	11,99	72,87
СЭС-3	Жамбылская	Трек.	9,59	25,17	29,11	10,16	74,03
СЭС-1	Алматинская	Стац.	15,49	23,41	22,74	14,45	76,09
СЭС-1	Кызылординская	Стац.	15,45	26,47	25,89	11,73	79,54
СЭС-1	Туркестанская	Трек.	12,31	32,10	30,94	10,50	85,84
СЭС-2	Туркестанская	Трек.	13,42	32,59	32,00	10,87	88,86
СЭС-3	Туркестанская	Трек.	13,41	31,22	31,83	12,16	88,63
СЭС-4	Туркестанская	Трек.	13,42	31,90	33,01	12,40	90,73
СЭС -1	Карагандинская	Стац.	18,76	29,18	26,99	11,12	86,05
СЭС -2	Карагандинская	Стац.	11,6	23,82	21,45	9,40	66,28

Таблица 14 – Фактическая годовая выработка электроэнергии за 2023 год на солнечных электростанциях мощностью 50 МВт в исследуемых областях Казахстана (по данным Министерства энергетики РК)

Объект СЭС	Регион, область	Конструкция	Выработка электроэнергии в 2023 году, (млн. кВт·ч)				
			I кв.	II кв.	III кв.	IV кв.	Годовая
СЭС -1	Жамбылская	Стац.	16,63	23,53	26,67	13,74	80,57
СЭС-2	Жамбылская	Стац.	15,19	23,85	26,39	12,80	78,23
СЭС-3	Жамбылская	Трек.	10,20	24,21	27,91	12,15	74,47
СЭС-1	Алматинская	Стац.	16,33	24,03	23,12	13,79	77,27
СЭС-1	Кызылординская	Стац.	16,50	24,33	25,62	14,83	81,28
СЭС-1	Туркестанская	Трек.	12,27	30,84	31,52	10,50	85,13
СЭС-2	Туркестанская	Трек.	14,80	30,85	31,21	13,36	90,22
СЭС-3	Туркестанская	Трек.	15,90	30,81	33,93	13,35	93,99
СЭС-4	Туркестанская	Трек.	15,80	30,80	31,12	12,80	90,52
СЭС -1	Карагандинская	Стац.	15,49	26,70	25,94	11,62	79,75
СЭС -2	Карагандинская	Стац.	15,97	25,10	18,85	14,18	74,10

Таблица 15 - Результаты расчёта показателей PR и удельной выработки на основе фактической генерации СЭС за 2023–2024 годы.

СЭС	Конструкция	2024 год			2023 год		
		Е_grid, млн. кВт·час	PR	Спес. Prod, кВт·час/к Втр	Е_grid, млн. кВт*час	PR	Спес. Prod, кВт·час/к Втр
Жамбылская область							
СЭС -1	Стационарная	77,01	0,789	1540,2	80,57	0,826	1611,4
СЭС-2	Стационарная	72,87	0,747	1457,4	78,23	0,802	1564,6
СЭС-3	Трекерная	74,03	0,696	1480,6	74,47	0,700	1489,4
Алматинская область							
СЭС-1	Стационарная	76,09	0,756	1521,8	77,27	0,767	1545,4
Кызылординская область							
СЭС-1	Стационарная	79,54	0,773	1590,8	81,28	0,790	1625,6
Туркестанская область							
СЭС-1	Трекерная	85,84	0,765	1716,8	85,13	0,758	1702,6
СЭС-2	Трекерная	88,86	0,744	1777,2	90,22	0,756	1804,4
СЭС-3	Трекерная	88,63	0,742	1772,6	93,99	0,788	1879,8
СЭС-4	Трекерная	90,73	0,785	1814,6	90,52	0,783	1810,4
Карагандинская область							
СЭС -1	Стационарная	86,05	0,844	1721,0	79,75	0,782	1595,0
СЭС -2	Стационарная	66,28	0,727	1325,6	74,10	0,813	1482,0

В Таблице 15 представлены результаты расчёта коэффициента производительности (PR) и удельной выработки электроэнергии (Specific Production) на основе фактической генерации солнечных электростанций за 2023–2024 годы, выполненные по формулам (6) и (7). Данные показатели позволяют объективно анализировать эксплуатационную эффективность СЭС различной конструкции и определить влияние климатических, технических и конструктивных факторов на выработку электроэнергии в условиях Республики Казахстан.

В Туркестанской области, отличающейся высоким уровнем солнечной инсоляции, электростанции демонстрируют наибольшую суммарную генерацию. Все четыре рассматриваемые объекта здесь оснащены трекерными системами и в течение 2023–2024 годов обеспечили выработку на уровне 85–93 млн кВт·ч в год каждая при коэффициентах PR в пределах 0,74–0,79. Напротив, в Жамбылской, Алматинской и Кызылординской областях, где установлены преимущественно стационарные СЭС, годовая генерация ниже — порядка 72–81 млн кВт·ч при аналогичных или чуть выше показателях PR (0,75–0,80). В Карагандинской области наблюдаются разнонаправленные результаты: СЭС-1 со стационарной установкой и двухсторонними модулями

обеспечила выработку около 86 млн кВт·ч ($PR \approx 0,844$), тогда как СЭС-2, использующая поликристаллические панели, показала существенно более низкую генерацию — около 66 млн. кВт·ч ($PR \approx 0,727$). Следует учитывать, что все электростанции эксплуатируются от 2 до 10 лет, что обуславливает естественное снижение производительности солнечных модулей из-за их деградации (в среднем 0,4–0,7 % в год). Тем не менее, сравнение между станциями в одинаковых климатических условиях позволяет выявить влияние конструктивных и технологических различий. Существенное влияние на выработку оказывает тип используемых фотомодулей. Объекты с двухсторонними монокристаллическими модулями демонстрируют более высокую энергоотдачу по сравнению с аналогами, оснащёнными поликристаллическими панелями. Так, в Туркестанской области СЭС-2 и СЭС-3 (двухсторонние монокристаллы) обеспечили удельную выработку на уровне 1700–1800 кВт·ч/кВт·год, превосходя СЭС-1 с поликристаллическими панелями (1710–1720 кВт·ч/кВт·год). Аналогичная картина наблюдается и в Карагандинской области, где СЭС-1 (стационарная установка с двухсторонними монокристаллическими модулями) значительно превзошла по эффективности СЭС-2, оборудованную обычными поликристаллическими модулями.

Климатические особенности Казахстана оказывают значительное влияние на выработку СЭС. Повышенные летние температуры вызывают перегрев панелей и снижение КПД (в PVsyst температурные потери составляют 1–6 % в годовом выражении). Потери от снежного покрова зимой и от загрязнения поверхности модулей в засушливые периоды (пыль, песок, сухая растительность) в совокупности составляют около 3–4 % в год от потенциальной генерации, что подтверждается результатами моделирования. Эти факторы особенно актуальны для регионов с континентальным климатом, таких как Жамбылская и Карагандинская области. В условиях недостаточной очистки панелей они могут дополнительно усугублять снижение эффективности. Кроме того, на выработку существенно влияет техническое состояние оборудования. Так, в Жамбылской области на СЭС-3 в течение 2023–2024 годов фиксировались частые отказы системы слежения, включая длительные периоды остановки трекеров и снижение точности позиционирования. Это привело к отклонению от оптимальных углов инсоляции и, как следствие, к заметному снижению генерации по сравнению с предыдущими периодами. Подобные технические сбои нивелируют потенциальные преимущества трекерной конструкции и подчёркивают важность регулярного технического обслуживания. Аналогичные потери могли иметь место и на СЭС-2 Карагандинской области, где зафиксировано резкое снижение генерации, вероятно обусловленное простоем оборудования или нарушениями в работе инверторов. В то же время станции, проходящие регулярное техническое обслуживание и эксплуатацию без значительных сбоев, демонстрируют устойчиво высокие показатели — как это видно на примере СЭС-1 в Карагандинской области.

Сравнительный анализ свидетельствует о том, что трекерные системы в среднем обеспечивают более высокую годовую выработку по сравнению со стационарными. Согласно результатам моделирования в PVsyst, преимущество трекеров составляет порядка 10–11 % как по удельной, так и по суммарной генерации: специфическая выработка трекерных СЭС варьируется в диапазоне 1845–1967 кВт·ч/кВт·год, в то время как для стационарных установок этот показатель составляет 1661–1702 кВт·ч/кВт·год. Данные эксплуатационного периода подтверждают этот вывод: в Туркестане, где все станции являются трекерными, наблюдается максимальная реальная генерация. Несмотря на разницу в техническом состоянии и эксплуатационном возрасте оборудования, можно утверждать, что при равных климатических условиях применение трекерных систем позволяет обеспечить прирост выработки электроэнергии в среднем на 10–11 % по сравнению с традиционными стационарными установками. Таким образом, дополнительная сложность и затраты на обслуживание трекерных механизмов могут быть оправданы за счёт прироста выработки и увеличения экономической отдачи.

4.4 Экономическая оценка трекерных и стационарных систем

В рамках данного исследования была проведена сравнительная экономическая оценка солнечных электростанций мощностью 50 МВт с использованием трекерной и стационарной конструкций модулей. Оценка включает расчёт капитальных затрат (CAPEX) и эксплуатационных расходов (OPEX) на основе данных мировой практики, а также доступных источников по действующим проектам. Капитальные затраты включают стоимость фотоэлектрических модулей, инверторов, конструкций крепления, строительных и монтажных работ, а также затрат на проектирование и подключение к сети [28]. По международным данным, установленные CAPEX крупномасштабных СЭС сегодня находятся в диапазоне \$1.0–1.5/Вт. Так, аналитики Lawrence Berkeley Lab (LBNL) отмечают, что средний CapEx крупных наземных СЭС в 2022 г. составлял примерно \$1.32/Вт, из которых у фиксированных систем ~\$1.20/Вт, а у одноосных трекерных – \$1.40/Вт. Это значит, что трекерные системы стоят примерно на 10–20 % дороже фиксированных. Аналогичные оценки приводит BloombergNEF: по их данным, добавка за трекерную конструкцию составляет порядка 5–9 % к капитальным затратам [5].

Введённая в эксплуатацию в 2020 году СЭС-1 с трекерной системой в Туркестанской области была реализована по проектной стоимости 24 млрд тенге (CAPEX). Операционные затраты трекерной линии оказались на 5 млн тенге в год больше, чем у аналогичной фиксированной (стационарной) линии. При этом годовая выработка трекерной системы примерно на 10–11 % (около 10 млн кВт·ч) больше, чем у фиксированной. Это согласуется с

литературными данными – например, в одном исследовании гибридная HSAT (одноосный трекер) система показала +9,06 % по выработке по сравнению с фиксированной [6]. Таким образом, трекерная СЭС-1 даёт примерно на 10 млн кВт·ч больше электроэнергии в год за счёт поворота солнечных панелей.

На солнечной электростанции СЭС-1, расположенной в Туркестанской области, применены одноосные трекерные системы производства Arctech Solar. Всего установлено 1 800 приводных рядов, работающих независимо друг от друга. На рисунке 23 представлен узел привода одной из таких трекерных систем, использующихся на данной электростанции.



Рисунок 23 – Узел привода одноосной трекерной системы Arctech Solar на СЭС-1 (Туркестанская область)

По фактическим данным эксплуатации станции, ежедневно проводится проверка синхронности и корректности работы трекеров, так как даже незначительные отклонения в угле наклона отдельных рядов могут привести к снижению суммарной генерации. В отличие от стационарных конструкций, эксплуатация трекерной системы требует дополнительных регулярных мероприятий: визуального осмотра приводов, оценки параметров электропитания, контроля температуры редукторов, а также периодического обслуживания механических узлов (смазка, проверка и подтяжка креплений) и компонентов управления. Эти действия входят в состав ежедневных и еженедельных регламентных работ обслуживающего персонала и требуют дополнительных трудозатрат. На основании внутренних учётных данных СЭС-1 среднегодовые затраты на комплектующие и расходные материалы трекерной системы составляют около 3,9 млн тенге. Перечень и расчёт указанных затрат приведены в таблице 16.

Таблица 16 – Годовые эксплуатационные затраты на обслуживание трекерной системы по данным СЭС-1 (Туркестанская область).

Узел / расходный материал	Назначение	Плановая потребность, шт. в год	Цена за ед., тыс. тенге	Годовая сумма, тыс. тенге
Инклинометр MEMS	Обратная связь по положению ряда	5	42	210
Привод постоянного тока (DC-gear motor)	Поворот балки $\pm 60^\circ$	10	95	950
Преобразователь-блок питания	Стабилизированное питание двигателя (24 V DC)	15	100	1 500
Контроллер Arctech DCB	Локальное ПЛК-управление, хранение алгоритма слежения	5	58	290
Смазка литиевая EP-2	Обслуживание редуктора	10 кг	27	270
Механическая кинематика (пружины, амортизаторы, втулки)	Демпфирование ветровых нагрузок, компенсация люфтов	5	100	500
Прочие материалы (предохранители, 3V батарейки, хомуты и т.п.)	Мелкий ремонт креплений и кабельных трасс	—	—	200
Всего по материалам				3 920

Кроме ремонтов, связанных с заменой оборудования, на станции также фиксируются поломки трекерной системы, не требующие установки новых деталей. По данным эксплуатационного журнала СЭС-1, в течение года в среднем происходит около 300 подобных инцидентов, к которым относятся программный сброс ошибок, перезагрузка контроллеров, а также зачистка или обжим окисленных контактов. Эти работы выполняются дежурной бригадой из двух специалистов, каждый из которых тратит на устранение около 0,5 часа, что в сумме составляет 1 человеко-час на один инцидент. При средней ставке 2 500 тенге в час, совокупные трудозатраты на данные виды работ составляют около 750 000 тенге в год. Таким образом, суммарные дополнительные эксплуатационные расходы, связанные с трекерной системой, по данным СЭС-1, составляют в среднем 5,25 млн тенге ежегодно.

Фиксированный тариф на выкуп электроэнергии от солнечных электростанций в Республике Казахстан составляет 34,61 тенге за 1 кВт·ч [11]. При дополнительной выработке электроэнергии, обусловленной применением трекерной системы, в объёме $\Delta E = 10$ млн кВт·ч в год, совокупная

дополнительная выручка составляет порядка 346 млн тенге в год. С учётом того, что годовые операционные расходы (ОРЕХ) трекерной установки превышают аналогичный показатель для стационарной системы в среднем на 5,25 млн тенге в год (по данным СЭС-1, Туркестанская область), величина чистого дополнительного годового дохода составляет приблизительно 340,75 млн тенге. Если принять, что капитальные затраты (CAPEX) на строительство фиксированной системы на 10 % ниже стоимости трекерной (что соответствует диапазону 5–15 % согласно данным международных источников [6]), то они составляют порядка 21,8 млрд тенге.

Таким образом, дополнительные капитальные вложения, обусловленные внедрением трекерной системы, составляют:

$$\Delta \text{CAPEX} = 24,0 - 21,8 = 2,2 \text{ млрд тенге.}$$

Простой срок окупаемости по формуле [6]:

$$T_{\text{пр}} = \frac{\Delta \text{CAPEX}}{\Delta \text{Выручка} - \Delta \text{ОРЕХ}} \quad (8)$$

$$T_{\text{пр}} = \frac{2,2 \text{ млрд тенге}}{346 - 5,25} = \frac{2,2 \text{ млрд тенге}}{340,75 \text{ млн/год}} \approx 6,5 \text{ год.}$$

С учётом дисконтирования по ставке 7 %, соответствующей среднему значению, принятому в экономических расчётах фотовольтаических проектов (по данным ATB NREL – Annual Technology Baseline) [6], дисконтированный срок окупаемости трекерной системы составляет около 8–9 лет. Это связано с тем, что дисконтирование — процесс приведения будущих денежных потоков к текущей стоимости — отражает снижение ценности доходов в будущем по сравнению с настоящим. В результате поступления от дополнительной генерации трекерной установки имеют меньший вес на ранних этапах, что типично для проектов с равномерным распределением выручки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной диссертационной работе проведено сравнительное исследование эффективности крупных солнечных электростанций мощностью 50 МВт с трековой и стационарной системами крепления модулей в условиях Казахстана. Целью исследования являлась количественная оценка преимуществ применения систем слежения на примере пяти областей Казахстана (Туркестанской, Жамбылской, Алматинской, Карагандинской и Кызылординской), выполненная путём моделирования в среде PVsyst и анализа фактических данных действующих электростанций. Методология включала моделирование как стационарных, так и одноосевых трековых систем с использованием географических координат реально функционирующих объектов. Для обеспечения корректности сравнительного анализа были заданы идентичные технические параметры всех рассматриваемых станций, за исключением типа используемых фотоэлектрических модулей. В частности, на СЭС-1 (Карагандинская область), а также на СЭС-2 и СЭС-3 (Туркестанская область) применялись двусторонние монокристаллические панели в соответствии с фактическими данными эксплуатации. Учёт реальных координат позволил отразить климатические и географические особенности регионов, включая уровень инсоляции, температурный профиль, ветровую нагрузку и рельеф, что обеспечило достоверность расчётов годовой выработки электроэнергии с учётом всех основных потерь. Установлено, что температурные потери варьируются по регионам: в южных областях (с жарким климатом) они достигают около 6 %, в то время как в центральных снижаются до 0,9 %. Кроме того, выявлено, что потери от загрязнения поверхности панелей и снежного покрова особенно актуальны для северных и возвышенных районов. Применение трековых систем позволяет компенсировать значительную долю оптических потерь: так, глобальная инсоляция в плоскости модулей при использовании трекеров возрастает более чем на 30 %.

Результаты моделирования и фактических измерений показали, что СЭС с трековыми системами и двусторонними панелями демонстрируют удельную выработку в диапазоне 1700–1800 кВт·ч/кВт·год, тогда как стационарные установки с поликристаллическими модулями — 1660–1720 кВт·ч/кВт·год. В целом, трековые станции обеспечивают в среднем на 10–11 % (около 10 млн кВт·ч в год) больше выработки электроэнергии по сравнению со стационарными. Это подтверждается, в частности, данными по Туркестанской области, где трековые станции продемонстрировали генерацию на уровне 85–93 млн кВт·ч в год, в то время как в Жамбылской, Алматинской и Кызылординской областях — порядка 72–81 млн кВт·ч.

Дополнительная выработка, обеспечиваемая трековой системой, требует учёта как эксплуатационных, так и инвестиционных затрат. По зарубежным данным, капитальные расходы (CAPEX) на строительство солнечных электростанций с трековой системой в среднем на 10 % выше по

сравнению со стационарными установками. По данным СЭС-1 в Туркестанской области с трекерной системой, дополнительные ежегодные расходы на её обслуживание составляют около 5,25 млн тенге. Несмотря на это, увеличение годовой генерации приводит к улучшению финансовых показателей. Согласно расчётам с учётом дисконтирования, при ставке 7 % (в соответствии с базой данных ATB NREL – Annual Technology Baseline), дисконтированный срок окупаемости (Discounted Payback Period) трекерной системы составляет порядка 8–9 лет. Это объясняется снижением текущей стоимости поступлений от дополнительной генерации в первые годы эксплуатации, что характерно для всех инвестиционных проектов с равномерным денежным потоком во времени. При этом следует отметить, что по мере увеличения масштабов производства и числа поставщиков оборудования трекерные системы становятся более доступными, а показатели их окупаемости — более привлекательными. Кроме того, при надёжной и бесперебойной эксплуатации срок окупаемости может дополнительно снижаться за счёт стабильной генерации и минимизации простоев.

В ходе исследования также были рассмотрены практические методы оптимизации работы СЭС в сложных погодных условиях. На электростанции ЮКСЭС 50 проведены экспериментальные мероприятия по снижению влияния кратковременных скачков генерации, вызванных эффектом «облачной кромки», и по повышению устойчивости к снегопадам. Ограничение мощности инверторов позволило стабилизировать выходную мощность и предотвратить перегрузки. Для ускоренного самоочищения от снега протестирован метод изменения угла наклона трекеров в ночное время. Предварительные испытания показали его высокий потенциал, что подтверждается аналогичными исследованиями, проведёнными специалистами Мичиганского Технологического Университета (США).

Таким образом, проведённая работа достигла поставленных целей, подтвердила научную и прикладную значимость трекерных решений для условий Казахстана и позволила сформулировать рекомендации для инженерной и инвестиционной практики. Полученные результаты могут быть использованы в будущих проектах солнечной генерации в стране, способствуя устойчивому развитию «зелёной» энергетики Казахстана.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Станфорд, Дж. М. Солнечные электрические системы / Дж. М. Станфорд. — М.: Энергия, 2016. — 512 с.
- 2 Беннет, М. Фотовольтаика и солнечная энергетика / М. Беннет. — СПб.: Политехника, 2017. — 256 с.
- 3 Кравченко, М. Основы солнечной энергетики / М. Кравченко. — М.: Наука, 2015. — 420 с.
- 4 Kalogirou, H. Solar Energy Engineering: Processes and Systems / H. Kalogirou. — 2nd ed. — Oxford: Elsevier, 2014. — 540 p.
- 5 Lauer, J. G. Evaluation of Single-Axis Solar Trackers for PV Systems / J. G. Lauer. — Solar Energy, 2018. — Vol. 169, pp. 209-220.
- 6 ATB NREL. Annual Technology Baseline Reports / National Renewable Energy Laboratory. — Golden, CO: NREL, 2019.
- 7 IEA PVPS. Trends in Photovoltaic Applications / International Energy Agency. — Paris: IEA, 2020.
- 8 Чекалов, М. В. Анализ эффективности солнечных станций с использованием различных систем слежения / М. В. Чекалов. — Энергетика и Экология, 2017. — № 4. — С. 22-29.
- 9 Global Solar Atlas [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://globalsolaratlas.info/map> (дата обращения: 21.01.2025).
- 10 Климат Казахстана по областям / РГП «Казгидромет» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.kazhydromet.kz/ru/klimat/klimat-kazahstana-po-oblastyam> (дата обращения: 25.04.2025).
- 11 QazaqGreen [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://qazaqgreen.com/map/> (дата обращения: 22.02.2025).
- 12 Solargis. Solar resource maps & GIS data [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://solargis.com/resources/free-maps-and-gis-data?locality=kazakhstan> (дата обращения: 25.04.2025).
- 13 PVsyst. PDF Tutorials [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.pvsyst.com/pdf-tutorials/> (дата обращения: 05.05.2025).
- 14 Юлдошев И. А., Шогучкаров С. К., Рустамова Ш. Ш., Курбанов Ю. М., Абриев Ш. А. Фотоэлектрическая установка с устройством очистки от снежного и ледяного покрова // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEЕ). — 2024. — № 07 (424). — С. 54–66.
- 15 Järvelä M., Valkealahti S. Modeling of inverter response under cloud-edge induced irradiance transients. — 2020.
- 16 Chutani A. и др. Effect of panel tilt on snow shedding performance in PV tracker systems. — Michigan Technological University, 2024.
- 17 СП РК 2.04-01-2017. Строительная климатология / Министерство индустрии и инфраструктурного развития Республики Казахстан. — Алматы, 2017.

- 18 Solargis Atlas. World Solar Resource Data [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://solargis.com> (дата обращения: 20.03.2025).
- 19 IEC 62817:2014. Photovoltaic systems – Design qualification of solar trackers. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2014.
- 20 IEC 61215-1-1:2021 / СТ РК IEC 61215-1-1:2020. Наземные фотоэлектрические модули – Оценка соответствия техническим требованиям. Часть 1-1: Особые требования к испытаниям кристаллических кремниевых фотоэлектрических модулей. – Женева: IEC, 2021; Астана: ЦентрНормТех, 2020.
- 21 Абдуллаев Б. М., Рустамова Ш. Ш. Практические решения для оптимизации работы солнечной фотоэлектрической станции в сложных погодных условиях на основе экспериментальных методов // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. – Ташкент, 2025. – № 88. – С. 628–640.
- 22 Global Solar Power Tracker / Global Energy Monitor [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://globalenergymonitor.org/ru/projects/global-solar-power-tracker/> (дата обращения: 25.04.2025).
- 23 Ramprabu J., Poovarasan V., Karunamoorthy B. Improving the Efficiency of Solar Panel by Continuous Energy Generation // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). – 2018. – Vol. 8, Issue 2S. – ISSN: 2249-8958.
- 24 Виссарионов В. И., Дерюгина Г. В., Кузнецова В. А., Малинин Н. К. Солнечная энергетика: Учебное пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – С. 49–61.
- 25 Коробатов Д. В., Серадская О. В., Сироткин Е. А. Система автоматической очистки поверхности солнечного модуля // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). – 2016. – № 11–12. – С. 59–68.
- 26 Wiser R.H., Bolinger M., Seel J. Benchmarking Utility Scale PV Operational Expenses and Project Lifetimes: Results from a Survey of U.S. Solar Industry Professionals. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2020.
- 27 Lugo Laguna D., Arcos Vargas A., Núñez Hernández F. A European Assessment of the Solar Energy Cost: Key Factors and Optimal Technology // Sustainability. 2021. Vol. 13, No. 6. 3238.
- 28 Farracho A., Castro R. Broad Spectrum Technical and Economic Assessment of a Solar PV Park: A Case Study in Portugal // Processes. 2024. Vol. 12, No. 6. 1143.
- 29 Пашнин С.М., Сакулин А.В., Чертова Т.В., Шерьязов С.К. Сравнение стационарных и трекерных солнечных установок по поступлению солнечной энергии на единицу площади // Сб. науч. тр. VI Междунар. конф. «Даниловские чтения — 2021». Екатеринбург: Изд во УрФУ, 2023. С. 442–447.
- 30 СТ КазННТУ - 09 - 2023. Работы учебные. Общие требования к построению, изложению, оформлению и содержанию текстового и графического материала.- КазННТУ, 2023.