



Tarmoqqa ulangan FESlearning barqarorlik ko'rsatkichini hisoblash metodikasi

Nilufar R. Avezova², Sanjar Q. Shog'oa'chqorov¹, Afzalxo'ja R. Qudratov^{1,a)}

²DSc, Farg'ona politexnika instituti, 150107, Farg'ona, 150107, O'zbekiston; avezovanr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4298-1041>

¹PhD, Toshkent davlat texnika universiteti, Tashkent, 100095, O'zbekiston; sanjar4242@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5684-9818>

^{1,a)}Tayanch doktorant, Toshkent davlat texnika universiteti, Tashkent, 100095, O'zbekiston; Afzalkhojakudratov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-9069-205X>

Dolzarbliji: tarmoqqa ulangan fotoelektrik stansiyalarini (FES) joriy etish, ayniqsa quyosh nurlanishi yuqori bo'lgan mamlakatlar, jumladan O'zbekiston uchun muhim ahamiyatga ega. FESning mavjudlik koeffitsienti ularning samaradorligini baholashda asosiy omillardan biri bo'lib, stansiyaning barqaror elektr energiyasi ishlab chiqarish qobiliyatini aks ettridi. Zamonaliv monitoring va tahlil usullari FES ekspluatatsiya xususiyatlarni yaxshilash, to'xtash vaqtlarini minimallashtirish va quyosh energiya tizimlarining iqtisodiy samaradorligini oshirish imkonini beradi.

Maqsad: ushbu tadqiqotning maqsadi – ekspluatatsion ma'lumotlar, iqlim sharoitlari va uskunaning texnik xususiyatlarni hisobga olgan holda, tarmoqqa ulangan fotoelektrik stansiyalar uchun mavjudlik koeffitsientini hisoblash metodikasini ishlab chiqish va takomillashtirish. Tadqiqotning asosiy vazifasi – FES mavjudlik vaqtiga ta'sir etuvchi omillarni tahlil qilish va ularning ishonchliligini oshirish yo'llarini ishlab chiqishdir.

Usullar: belgilangan maqsadlarga erishish uchun turli iqlim sharoitlarida ishlayotgan FESlearning ekspluatatsion ko'rsatkichlari bo'yicha taqoslash tahlili amalga oshirildi. Tadqiqotda standart mavjudlik koeffitsientini hisoblash metodikasi, sun'iy yo'ldosh monitoringi ma'lumotlari, SCADA tizimlarining ko'rsatkichlari va matematik modellar qo'llanildi. Bu yondashuv iqlim va ekspluatatsion omillarning FES samaradorligiga ta'sirini aniqlash imkonini beradi.

Natijalar: tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, tarmoqqa ulangan FESning mavjudlik koeffitsienti aksariyat hollarda 98,5% dan yuqori bo'lib, minimal to'xtash va standart texnik xizmat ko'rsatish sharoitida maksimal samaradorlikka erishiladi. Iqlimi ma'lumotlar tahlili shuni tasdiqladiki, issiq havo sharoitlari tizim samaradorligini pasaytirishi mumkin, lekin SCADA tizimlaridan foydalanish va masofaviy monitoring jarayoni yo'qotishlarni minimallashtirishga yordam beradi. Tadqiqot shuningdek, boshqaruv tizimlarini modernizatsiya qilish va muntazam texnik xizmat ko'rsatish FESning ishonchliligi hamda iqtisodiy samaradorligini oshirishini ko'rsatdi.

Kalit so'zlar: fotoelektrik stansiyalar, barqarorlik koeffitsienti, monitoring, SCADA, samaradorlik, iqlim sharoiti.

Методика расчета показателя доступности сетевых ФЭС

Нилуфар Р. Аvezova², Санжар К. Шогучкаров¹, Афзалхўжа Р. Кудратов^{1,a)}

²Доктор технических наук (DSc), Ферганский политехнический институт, 150107, Фергана, 150107, Узбекистан; avezovanr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4298-1041>

¹PhD, Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; sanjar4242@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5684-9818>

^{1,a)}Базовый докторант, Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; Afzalkhojakudratov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-9069-205X>

Актуальность: внедрение сетевых фотоэлектрических станций (ФЭС) является важной частью развития возобновляемой энергетики, особенно в странах с высоким уровнем солнечной радиации, таких как Узбекистан. Коэффициент доступности ФЭС играет ключевую роль в оценке их эффективности, так как отражает способность станции обеспечивать стабильную генерацию электроэнергии. Современные методики мониторинга и анализа позволяют улучшить эксплуатационные характеристики ФЭС, минимизировать простоту и повысить экономическую эффективность солнечных энергосистем.

Цель: исследование направлено на разработку и совершенствование методики расчета коэффициента доступности сетевых фотоэлектрических станций, с учетом эксплуатационных данных, климатических условий и технических характеристик оборудования. Целью работы является анализ факторов, влияющих на время доступности ФЭС, а также разработка подходов к повышению надежности и эффективности их работы.

Методы: для достижения поставленных целей использовались методы сравнительного анализа эксплуа-



тационных характеристик ФЭС в различных климатических условиях, а также стандартные методы расчета коэффициента доступности. В исследовании применены данные спутникового мониторинга, показатели работы SCADA-систем и облачных платформ, а также математические модели, позволяющие учитывать влияние климатических и эксплуатационных факторов на производительность ФЭС.

Результаты: показали, что коэффициент доступности сетевых ФЭС в большинстве случаев превышает 98,5% при минимальных простоях и стандартном техническом обслуживании. Анализ климатических данных подтвердил, что жаркие условия могут снижать эффективность системы, но использование SCADA-систем и удаленного мониторинга позволяет оперативно реагировать на изменения и минимизировать потери. Исследование также выявило, что модернизация системы управления и регулярное техническое обслуживание способны повысить надежность ФЭС и их экономическую эффективность.

Ключевые слова: фотоэлектрические станции, коэффициент доступности, мониторинг, SCADA, эффективность, климатические условия.

Methodology for calculating the indicator of availability of network PV power plants

Nilufar R. Avezova², Sanjar K. Shoguchkarov¹, Afzalkhuja R. Kudratov^{1,a)}

²Doctor of Technical Sciences (DSc), Fergana Polytechnic Institute, 150107, Fergana, 150107, Uzbekistan; avezovanr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4298-1041>

¹ PhD, Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; sanjar4242@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5684-9818>

^{1,a)} basic doctoral student, Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; Afzalkhojakudratov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-9069-205X>

Relevance: the introduction of grid-connected photovoltaic (PV) plants is an important part of renewable energy development, especially in countries with high solar radiation, such as Uzbekistan. The availability factor of PV power plants plays a key role in assessing their performance, as it reflects the ability of the plant to provide stable electricity generation. Modern monitoring and analysis techniques can improve the performance of PV power plants, minimize downtime and increase the economic efficiency of solar energy systems.

Aim this study aims to develop and improve the methodology for calculating the availability coefficient of grid-connected photovoltaic power plants, taking into account operational data, climatic conditions and technical characteristics of the equipment. The aim of the work is to analyze the factors affecting the availability time of PV power plants and to develop approaches to improve the reliability and efficiency of their operation.

Methods: to achieve the set objectives, methods of comparative analysis of operational characteristics of FES in different climatic conditions, as well as standard methods of calculating the availability factor were used. The study used satellite monitoring data, SCADA-systems and cloud platforms performance indicators, as well as mathematical models that allow taking into account the influence of climatic and operational factors on the FES performance.

Results: the results of the study showed that the availability factor of grid PV plants in most cases exceeds 98.5% with minimal downtime and standard maintenance. Analysis of climatic data confirmed that hot conditions can reduce system efficiency, but the use of SCADA systems and remote monitoring allows for rapid response to changes and minimizes losses. The study also revealed that modernization of the control system and regular maintenance can improve the reliability of PV power plants and their economic efficiency.

Key words: photovoltaic power plants, availability factor, monitoring, SCADA, efficiency, climatic conditions.

Key words: PV power plants, availability factor, monitoring, SCADA, efficiency, climate conditions.

1. Введение. (Introduction)

Развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в частности ФЭС, является ключевым направлением устойчивого развития энергетики многих стран, включая Узбекистан [1]. Одним из основных параметров, определяющих эффективность работы ФЭС, является коэффициент доступности, отражающий способность станции обеспечивать стабильную генерацию электроэнергии (ЭЭ) на протяжении заданного периода времени. Данный показатель зависит от множества факторов, включая климатические условия (КУ), качество оборудования и регулярность технического обслуживания [2]. Для более глубокого анализа факторов, влияющих на доступность сетевых ФЭС, важно учитывать результаты существующих исследований, которые освещают влияние КУ, эксплуатационных параметров и технологий мониторинга на их производительность.

Далее рассмотрим ключевые исследования, посвященные этим вопросам. Литературный обзор охватывает наиболее значимые работы в этой области, такие как исследования доступности



систем малой мощности с учетом данных о простоях, термических потерях и влиянии климатических факторов. Рассмотрены примеры систем, функционирующих в условиях Узбекистана, Южной Индии и Северной Африки, что позволяет сделать выводы о необходимости комплексного подхода к повышению надежности и доступности ФЭС.

В работе авторов Мардонова и Чои [3] представлены результаты исследований по оценке потенциала восьми шахтных месторождений Узбекистана для установки ФЭС мощностью 1 МВт. В условиях отсутствия наземных метеостанций использованы данные спутникового мониторинга. Анализ выполнен с применением программного обеспечения RETScreen, которое позволяет оценить производство энергии, сокращение выбросов парниковых газов и финансовые показатели. Наиболее высокий потенциал показала шахта Тебинбулук, где годовая выработка составила 1685 МВт·ч, а сокращение выбросов CO₂ - около 930 тонн. При этом, чистая приведенная стоимость проекта (NPV) составила 2,217 млн. долларов США, срок окупаемости – 13 лет.

В работе основной упор сделан на оценку потенциальной выработки энергии и экономической целесообразности, что предполагает, что расчеты проводились для системы с минимальным временем простоя. Для оценки коэффициента доступности в рассматриваемой станции значительных простоев и неисправностей не указано, если считать среднее количество солнечных часов в году в Узбекистане составляет около 2800 часов, с учетом заявленной выработки можно оценить доступность системы около 99%.

Работа авторов Raxmatov и др. [4], посвящена анализу работы ФЭС мощностью 300 кВт на протяжении года в различных регионах Узбекистана. Максимальная годовая мощность составляет 0,477 МВт·ч, минимальная – 0,452 МВт·ч. Также исследовано сокращение выбросов CO₂ на уровне 90,4–95,5 тонн.

Экономическая модель показывает, что срок окупаемости системы варьируется от 8,6 до 9 лет. Исследование демонстрирует, что региональные КУ оказывают значительное влияние на эффективность ФЭ систем, при учёте показателей региональной солнечной инсоляции.

Максимальная разница между выработкой за год составляет менее 5%. Это говорит о стабильной работе системы. Если учитывать стандартные периоды на техническое обслуживание (обычно 1–2% времени), предполагаемый коэффициент доступности системы составляет – 98,7%, где количество T_{общ}=8760 часов (год), а предполагаемые простои – менее 100 часов в год.

В работе авторов Nescaïbia и др. [5], приведены результаты анализа работы солнечной системы мощностью 2,5 кВт, со следующими показателями параметров: КПД модуля – 14,19%, инвертора – 95,34%, системы в целом – 13,53%; результаты установлены для засушливого климата южного Алжира и выполнены на основе годичных данных. Среднегодовая температура местности составляет 28,3°C. В настоящем исследовании оценены влияние температуры и солнечного излучения на производительность системы, а также показатели производительности. При этом PR (коэффициент производительности) системы варьируется от 66,66% до 85,93%,

Известно, что в жарком климате ключевым фактором снижения эффективности ФЭС является температура; потеря производительности может быть связана именно с условиями работы. Так как потери на простои отсутствуют, т.е. система функционирует стабильно, то при таких условиях коэффициент доступности предположительно близок к 99%, если не учитывать мелкое техническое обслуживание.

В работе Sahouane и др. [6] представлены результаты исследований, посвященные анализу ФЭС мощностью 28 кВт (установленные КПД системы составляет 10,99%, и 96,46% инвертора) в условиях Сахары. Здесь оценка эффективности показала годовую генерацию в 45,12 МВт·ч., потери энергии составляют 2,4 МВт·ч из-за повышения напряжения в сети и 1,57 МВт·ч термических потерь, что показывает целесообразность подобных проектов при условии регулярного технического обслуживания для снижения потерь.

В данной системе основными проблемами стали сетевые и тепловые потери, но явных простоев не было. Эти данные подтверждают высокую доступность системы, которая без учета погодных факторов и перегрева оценивается в пределах 98,5–99%, поскольку все потери были связаны с неизбежными внешними факторами.

В работе авторов Ramanan и др. [7], исследователи анализируют работу двух фотоэлектрических систем: (p-Si и CIS) в жарком и влажном климате Южной Индии, где среднегодовая температура достигает 35°C. На исследуемых станциях показатели годовой выработки составляют 1536,9 кВт·ч для p-Si и 1698,4 кВт·ч для CIS; при этом показатели эффективности: PR – 78,48% для p-Si и 86,73% для CIS; показатель фактора использования мощности: 17,99% для p-Si и 19,57% для CIS, соответственно.

Как видно из вышеуказанного, система CIS показывает меньшие потери мощности, по сравнению с p-Si. Прямых данных о сбоях нет, что предполагает отсутствие значительных про-



стоев. Учитывая, что разница между теоретической и реальной выработкой связана с климатическими условиями, можно оценить коэффициент доступности системы СИС на уровне 99%, а для Р-Си – 98,5%, из-за больших тепловых потерь.

Практически во всех рассмотренных исследованиях коэффициент доступности систем находится в пределах 98,5–99% при отсутствии значительных простоев и с учетом стандартного технического обслуживания. При этом необходимо отметить, что основные факторы, влияющие на показатель:

- жаркий климат снижает эффективность из-за повышения температуры панелей;
- технические неполадки и перегрев инверторов могут увеличивать простой, если нет системы охлаждения;
- сетевые потери, как в случае Алжира, могут быть компенсированы модернизацией сети и внедрением охлаждающих систем.

Основной целью данного исследования является анализ и усовершенствование подходов к расчету коэффициента доступности сетевых ФЭС с использованием практических данных об их работе. Для этого проведен анализ эксплуатационных характеристик ФЭС малой мощности, установленных в регионах с различными КУ, включая пустынные и полупустынные территории. В работе применяются данные спутникового мониторинга и SCADA-систем, что позволяет проводить непрерывный мониторинг работы оборудования, выявлять неисправности и минимизировать потери производительности.

2. Методика и материалы (Methods and materials)

Для расчёта коэффициента доступности сетевых ФЭС обычно используются операционные данные, которые отражают производительность, и состояние станции за определённый период времени. Ниже приводятся основные виды данных, которые применяются для расчёта показателя доступности ФЭС:

1. Данные о выработке ЭЭ, которые включают фактические объёмы произведённой ЭЭ за определённые интервалы времени (кВт·ч, МВт·ч). Эти данные позволяют сравнить фактическую генерацию с запланированными или максимально возможными.

2. Данные об ограничениях в работе станции, которые показывают время простоев ФЭС из-за неисправностей, планового обслуживания или неблагоприятных погодных условий; информацию о неполадках в оборудовании, таких как инверторы, фотоэлектрические модули (ФЭМ), трансформаторы.

3. Показатели метеорологических данных местности, такие как интенсивность солнечного излучения (солнечная инсоляция), измеренная на месте, температура окружающей среды (ОС), скорости ветра и другие параметры, влияющие на производительность ФЭС.

4. Данные о плановом обслуживании ФЭС в течении года или за определенный период, – такие как продолжительность и частота запланированных технических мероприятий, учет периодов, когда станция намеренно отключалась для обслуживания.

5. Потенциальная (максимальная) выработка ФЭС, которая подразумевает расчётное значение возможной генерации ЭЭ на основе доступной солнечной энергии (СЭ) и технических характеристик станции.

Расчетная формула коэффициента доступности (К) ФЭС обычно определяется как отношение фактического времени, когда станция была в работоспособном состоянии, к общему доступному времени за период [4]:

$$K = \frac{T_{\text{дост}}}{T_{\text{общ}}} \cdot 100\%; \quad (1)$$

где $T_{\text{общ}}$ – общее время периода (среднее количество солнечных часов в году для региона); $T_{\text{дост}}$ – время, когда станция была готова к работе.

Отметим, что необходимо также выполнить сравнение с целевыми значениями: если показатель доступности системы снижается, ниже установленного порога (например, 99,5%), инициируются действия по улучшению работы системы: ускорение ремонта, оптимизация графика обслуживания, обновление оборудования.

Рассмотрим практический пример по оценки коэффициента доступности сетевых СФЭС мощностью 10 МВт. За месяц система должна работать 720 часов. Однако из-за поломки инвертора система простояла 5 часов. Рассчитаем коэффициент доступности:

$$K = \left[\frac{(720-5)}{720} \right] \cdot 100\% = 99,31\%. \quad (2)$$

Коэффициент доступности составляет 99,31%, он показывает, что станция работала исправно в течение подавляющего большинства времени месяца, и лишь 0,69% времени было потрачено на простой из-за поломки. Этот показатель может быть приемлемым или требовать улучшения в зависимости от целевых значений, установленных рассматриваемой системы.



Немаловажным при этих исследованиях является параметр, называемый мониторинг коэффициента доступности системы (МКДС), который означает постоянный сбор, анализ и визуализацию данных, чтобы отслеживать, насколько эффективно оборудование, такое как сетевые ФЭС, функционирует в заданные временные интервалы [8]. Целью МКДС является обеспечение стабильной и надёжной работы системы, а также своевременное обнаружение и устранение неисправностей; мониторинг в свою очередь даёт возможности:

- поддержание высокой эффективности: систематический контроль помогает минимизировать простоту и повысить производительность;
- оптимизация затрат: быстрое выявление неисправностей снижает расходы на ремонт и потерю энергии;
- составление отчётности КДС – ключевой метрики для оценки эффективности работы, которую часто требуют инвесторы, регулирующие органы или заказчики.

МКДС включает следующие показатели системы:

сбор данных: время работы оборудования (сколько часов система функционировала исправно), время простоя (включая запланированные и незапланированные отключения), состояние ключевых компонентов системы, таких как инверторы, ФЭП и трансформаторы;

оценка эффективности работы: расчёт коэффициента доступности в реальном времени или за определённые периоды (день, неделя, месяц), сравнение фактического времени работы с целевыми параметрами;

идентификация проблем: автоматическое обнаружение отказов, снижения мощности или других аномалий, определение причин простоев (неисправности, погодные условия, обслуживание и т.д.);

профилактика: предоставление прогноза отказов на основе данных (прогнозное обслуживание), своевременное оповещение.

Таким образом, МКДС помогает операторам своевременно выявлять и устранять отклонения в работе, что повышает надёжность и доступность сетевых ФЭС.

Мониторинг осуществляется с помощью автоматизированных средств контроля и управления, таких как SCADA-системы и удалённые платформы мониторинга.

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) – это автоматизированная система управления, используемая для мониторинга работы ФЭС [9]. Она собирает данные с датчиков и оборудования в реальном времени, визуализирует параметры системы (например, мощность, напряжение, температура, количество отказов), а также передаёт информацию на центральный сервер или облачную платформу. Кроме того, SCADA генерирует отчёты о коэффициенте доступности для анализа и принятия решений.

Удалённые платформы мониторинга – это облачные системы, которые работают через интернет и позволяют операторам отслеживать состояние ФЭС из любой точки мира. Такие платформы предоставляют информацию о состоянии КДС в виде графиков, метрик и аналитических отчётов. Например, платформа Solar Edge Monitoring Platform, которая показывает эффективность работы солнечных панелей, время простоев, прогнозы по выработке энергии и состояние инверторов в режиме реального времени.

3. Результаты и обсуждения (Results and discussion)

Далее рассмотрим ресурсные показатели и параметры функционирования для расчета показателя доступности сетевой ФЭС мощностью 10 кВт, установленной в Отделе юстиции Хатырчинского района, Навоийской области; координаты географической местности составляют 40°02' северной широты, 65°58' восточной долготы, расположение - 559 м над уровнем моря. СФЭС установлена на плоской крыше административного здания, с помощью дополнительных металлических конструкций, по ориентации 170° и угла наклона 40° (рис.1).



Рис.1. Спутниковый снимок с видимым расположением СФЭС мощностью 10 кВт на крыше административного здания Отдела юстиции Хатырчинского района

Fig. 1. Satellite image with visible location of 10 kW PV plant on the roof of the administrative building the Department of Justice of Khatyrchi district



Климат региона отличается резко континентальными чертами с характерной пустынной и засушливой погодой. Жаркий период продолжается около 3,6 месяцев, начинается 22 мая и заканчивается 11 сентября, когда среднесуточная температура превышает 31 °C. Наиболее жарким месяцем считается июль, когда температура в среднем достигает 37 °C в дневное время и опускается до 21 °C ночью [10].

Холодный период длится примерно 3,5 месяца – с 23 ноября по 5 марта. В этот сезон среднесуточная температура опускается ниже 12 °C. Значения максимальной, минимальной и средней температуры по месяцам в Навоийской области, представлены в табл.1 [10].

Таблица 1. Значения максимальной, минимальной и средней температуры ОС по месяцам в Навоийской области [10]

Table 1. Values of maximum, minimum and average OS temperature by months in Navoi region [10]

	янв	февр	март	апр	май	июнь	июль	авг	сент	окт	нояб	дек
Максимальная	7 °C	9 °C	15 °C	23 °C	30 °C	35 °C	37 °C	35 °C	30 °C	22 °C	14 °C	9 °C
Средняя темп.	2 °C	4 °C	9 °C	17 °C	23 °C	28 °C	30 °C	28 °C	22 °C	14 °C	8 °C	3 °C
Минимальная	-2 °C	-1 °C	4 °C	10 °C	15 °C	19 °C	21 °C	19 °C	13 °C	7 °C	2 °C	-1 °C

В Навоийской области средний процент неба, покрытого облаками, испытывает экстремальные сезонные колебания в течение года. Более ясная часть года в Навоийской области начинается примерно 16 мая и длится 5,1 месяца, заканчиваясь примерно 20 октября. Самый ясный месяц в году в Навоийской области – август, во время которого небо в среднем ясное, преимущественно ясное или имеет переменную облачность 98 % времени [10]. Более облачная часть года начинается примерно 20 октября и длится 6,9 месяца, заканчиваясь примерно 16 мая. Самый пасмурный месяц в году в Навоии - январь, во время которого небо в среднем пасмурное или преимущественно облачное 53 % времени. Значения уровня облачности и ясности по месяцам в Навоийской области, представлены в табл.2 [10].

Таблица 2. Значения уровней облачности и ясности по месяцам в Навоийской области [10]
Table 2. Cloudiness and clarity values by month in Navoi region [10]

	янв	февр	март	апр	май	июнь	июль	авг	сент	окт	нояб	дек
Более облачно	53 %	51 %	49 %	41 %	26 %	8 %	3 %	2 %	8 %	26 %	42 %	49 %
Более ясно	47 %	49 %	51 %	59 %	74 %	92 %	97 %	98 %	92 %	74 %	58 %	51 %

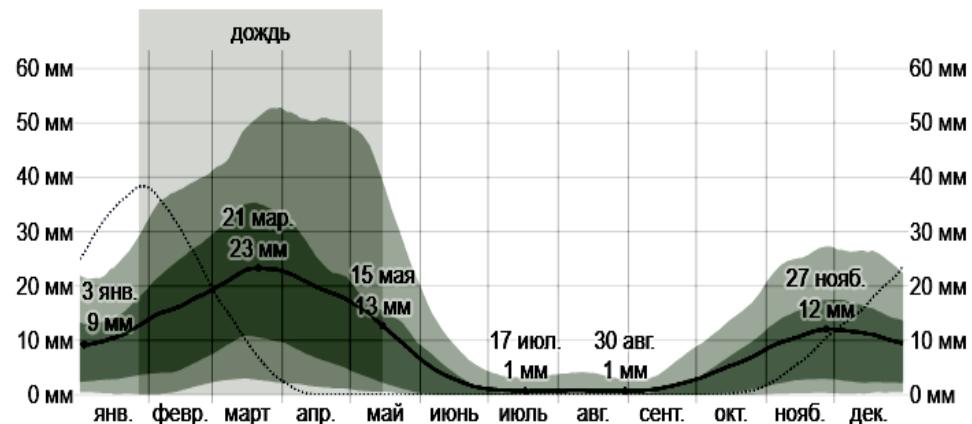


Рис.2. Среднемесячные значения выпадения осадков в Хатырчинском районе [10]
Fig.2. Monthly averages of precipitation in Khatyrchi district [10]



Согласно Российскому климатологу Владимир Кеппену [11], влажными считаются дни, в течение которых количество выпавших осадков составляет не менее 1 миллиметра в жидком или эквивалентном виде. В Навои частота таких дней заметно меняется на протяжении года – более дождливый период продолжается около 6,2 месяцев: с 10 ноября по 15 мая, когда вероятность выпадения осадков превышает 9 %. Самым дождливым месяцем является март, в среднем характеризующийся пятью днями с осадками [10].

Сухой сезон длится примерно 5,8 месяцев: с 15 мая по 10 ноября, при этом самый засушливый месяц – июль, когда осадки выпадают в среднем лишь на 0,2 дня за месяц.

Согласно Р.Р. Авезову [12], годовая сумма прихода прямого СИ, на нормальную к солнечным лучам поверхность составляет 1900-2100 $\text{kVt}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ на севере и 1910-1980 $\text{kVt}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ на юге Навоийской области, доказывая, что регион имеет благоприятные условия для использования СЭ [12].

В табл.3 представлены среднемесячные значения прямой нормальной СР, поступающей на поверхность, ориентированную перпендикулярно солнечным лучам в регионе [13].

Таблица 3. Среднемесячные значения прямой нормальной СР, поступающей на поверхность, ориентированную перпендикулярно солнечным лучам DNI в Навоийской области [13]

Table 3. Average monthly values of direct normal SR arriving at the surface oriented perpendicular to the solar rays DNI in Navoi region [13]

Месяцы	Значения DNI, $\frac{\text{kVt}\cdot\text{ч}}{\text{м}^2}$	Месяцы	Значения DNI, $\frac{\text{kVt}\cdot\text{ч}}{\text{м}^2}$
Январь	80,1	Июль	234,8
Февраль	91,7	Август	203
Март	119,9	Сентябрь	151,4
Апрель	150,5	Октябрь	95,2
Май	192	Ноябрь	80,3
Июнь	226,1	Декабрь	
За год	237,9		

Как видно из табл.2, суммарная прямая СР (DNI) минимального значения достигает в январе ($80,1 \text{ kVt}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$), а максимального значения достигает в июле ($237,9 \text{ kVt}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$). При этом, годовой показатель составляет $1863,1 \text{ kVt}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, что свидетельствует о высоком солнечном потенциале региона. Наиболее продуктивный период для солнечной энергетики – с мая по август, когда радиация остается на пиковом уровне.

Согласно данным солнечного атласа [13], максимальные значения прямой нормальной СР ($\text{Вт}/\text{м}^2$) за сутки в регионе наблюдаются летом (май–июль), достигая пиковых значений $727-777 \text{ Вт}/\text{м}^2$ в дневные часы (10:00–15:00), тогда как зимой (декабрь–январь) эти показатели значительно ниже, около $376-396 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Суммарная дневная СР варьируется от $2592 \text{ Вт}/\text{м}^2$ в декабре до $7674 \text{ Вт}/\text{м}^2$ в июле, что соответствует сезонным колебаниям солнечной активности.

Обобщая данные, следует выделить ключевые моменты, влияющие на производительность ФЭС и СР в данном регионе, а также оценить солнечный потенциал и выбрать оптимальную конфигурацию системы:

DNI – $1861 \text{ kVt}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$,
GHI – $1771 \text{ kVt}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$,
GTI – $2056,9 \text{ kVt}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$,
средняя температура воздуха – $14,3^\circ\text{C}$,
оптимальный угол наклона ФЭП – 35° .

Далее рассмотрим основные характеристики и параметры ФЭС мощностью 10 кВт, установленной для обеспечения энергоснабжения Отдела юстиции Хатырчинского района. В состав станции входят 20 ФЭМ, каждый из которых имеет номинальную мощность 535 Вт. Для производства ФЭМ использован монокристаллический кремний, а их мощность сертифицирована при стандартных условиях: АМ 1,5, интенсивность излучения $1000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ и температура $25^\circ\text{C} (\pm 2^\circ\text{C})$.

Основные характеристики кремниевых монокристаллических ФЭП, а также использованного солнечного инвертора 10 кВт приведены в табл.4 и табл.5.

Схема подключения ФЭС мощностью 10 кВт, установленной в Отделе юстиции Хатырчинского района к сети, представлена на рис.3.



Таблица 4. Основные электромеханические характеристики кремниевых монокристаллических ФЭП в составе ФЭС мощностью 10 кВт

Table 4. Main electromechanical characteristics of silicon monocrystalline panels as part of 10 kW PV plant

Модель	LR5-72HPH 535M Longi
Тип материала	моноцирсталический
Максимальная мощность, P_m (Вт)	535
Напряжение в ТММ, V_{mp} (В)	42,5
Ток в ТММ, I_{mp} (А)	12,9
Напряжение холостого хода, U_{XX} (В)	49,35
Ток короткого замыкания, I_{K3} (А)	13,78
КПД СП, (%)	20,9
Размеры, $\Delta \times Ш \times В$ (мм)	2256×1133×35
Вес, m (кг)	27,2
Максимальная статическая нагрузка, P (Па)	5400

Таблица 5. Основные параметры солнечного инвертора 10 кВт

Table 5. Main parameters of the solar inverter 10 kW

Модель	SUN2000-10KTL-M1 Huawei
Макс. Эффективность	98,40 %
Макс. Входное напряжение	1100 V
Макс. Ток на MPPT	13,5 A
Макс. Ток короткого замыкания на MPPT	19,5 A
Диапазон рабочего напряжения MPPT	200-1000 V
Количество входов	2
Количество MPP-трекеров	2
Номинальная активная мощность переменного тока	10000 W
Макс. Кажущаяся мощность переменного тока	11000 W
Номинальное выходное напряжение	380/400
Номинальный выходной ток	17 A

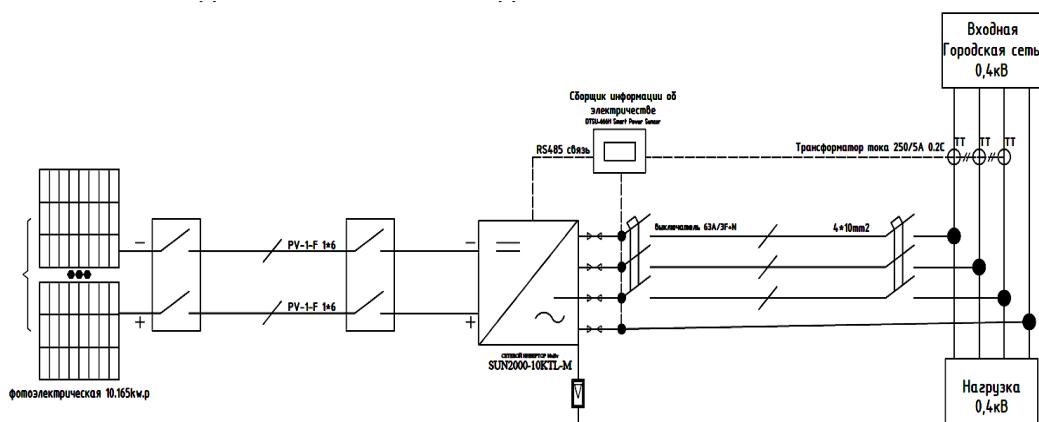


Рис.3. Схема подключения к сети ФЭС мощностью 10 кВт, установленной в Отделе юстиции Хатырчинского района

Fig. 3. Scheme of connection of the 10 kW PV plant installed in the Department of Justice of Khatyrchi district to the grid

Как видно из табл.6, за год станция выработала 13894,7 кВт·ч ЭЭ, с максимальной генерацией в июле (1895,3 кВт·ч) и минимальной в декабре (401,1 кВт·ч), пиковая мощность системы варьировалась от 8.394 кВт в декабре до 10.998 кВт в марте. В результате за год удалось предотвратить выброса 6,6 тонн CO_2 , а также сократить использование угля на 5,556 тонн, заменяя традиционные источники энергии. Статические данные получены из системы мониторинга Fusion Solar компании Huawei, установленной в инверторе и являются достоверными. Данная система мониторинга также осуществляет сбор данных – время работы оборудования (сколько часов система функционировала исправно), время простоя (включая запланированные и незапланированные отключения), состояние ключевых компонентов системы и др.



Данная ФЭС установлена в 2023 году, а её эксплуатация началась с января 2024 года. Станция обеспечивает выработку ЭЭ для нужд Отдела юстиции Хатырчинского района. Показатели среднемесячной и годовой выработки ЭЭ, пиковой мощности по месяцам и предотвращения CO₂, а также значения сэкономленного угля представлены в Табл.6.

Таблица 6. Показатели среднемесячной и годовой выработки ЭЭ, а также экологические показатели работы ФЭС мощностью 10 кВт, установленной в Хатырчинском районе за 2024 г

Table 6. Indicators of average monthly and annual energy production, as well as environmental performance of the 10 kW PV power plant installed in Khatyrchi district in 2024

Статистический период	Генерация, (кВт*ч)	Пиковая мощность, (кВт)	CO ₂ Предотвращено, (т)	Стандартный объем сэкономленного угля, (т)
2024-01	613,5	10,030	0,291	0,245
2024-02	651,0	9,604	0,309	0,260
2024-03	1197,7	10,998	0,569	0,479
2024-04	1325,9	10,362	0,630	0,530
2024-05	1669,8	10,660	0,793	0,668
2024-06	1788,1	9,647	0,849	0,715
2024-07	1895,3	9,581	0,900	0,758
2024-08	1656,7	9,555	0,787	0,663
2024-09	963,4	9,961	0,458	0,385
2024-10	991,5	9,807	0,471	0,397
2024-11	740,8	9,295	0,352	0,296
2024-12	401,1	8,394	0,191	0,160
За 2024й год	13 894,7		6,600	5,556

Из данной системы мониторинга получены также параметры, такие как: количество остановок ФЭС; из них в связи: с отключением сети, с напряжением ниже установленного минимального предела и выше установленной (табл.7). Отметим, что на инверторе установлен стандарт сети EN50549-LV – европейский стандарт, который регулирует подключение и эксплуатацию распределённых генераторов (например, ФЭС, ветровых турбин) в сетях низкого напряжения (LV). Он используется для интеграции источников ВЭ в распределительные сети с целью обеспечения стабильности, безопасности и надёжности энергосистемы. В этом стандарте инвертор будет работать в нормальном режиме: 230В ±10%, то есть от 207В до 253В. За пределами этого напряжение инвертор будет снижать генерацию или будет действовать по заданным уставкам.

Таблица 7. Статистика остановок работы ФЭС мощностью 10 кВт, установленной в Хатырчинском районе по причинам сбоев напряжения и отключений сети за 2024 г

Table 7. Statistics of outages of the 10 kW PV power plant installed in Khatyrchi rayon due to voltage failures and grid outages for 2024

Месяцы	год	Общее число остановок	Отключение сети	Напряжение ниже уставки	Напряжение выше установленной
Январь	2024	52	4	13	35
Февраль	2024	76	11	15	50
Март	2024	57	43	2	12
Апрель	2024	73	8		65
Май	2024	33	7		26
Июнь	2024	23	5	5	13
Июль	2024	5	1		4
Август	2024	22	7		15
Сентябрь	2024	117	7		110
Октябрь	2024	15	5	6	4
Ноябрь	2024	61	4	22	35
Декабрь	2024	79	3	12	64

Как видно из табл.7, наибольшее количество остановок связано с превышением напряжения выше установленного предела. Например, в сентябре таких случаев было 110 из общего числа 117 остановов, что указывает на проблемы с перенапряжениями в сети. Отключения сети и



снижение напряжения ниже уставки встречаются реже, но также оказывают влияние на работу системы. Например, в феврале из 76 остановок только 11 связаны с отключением сети, а 15 – с понижением напряжения.

На рис.4 представлены данные мониторинга работы ФЭС мощностью 10 кВт.

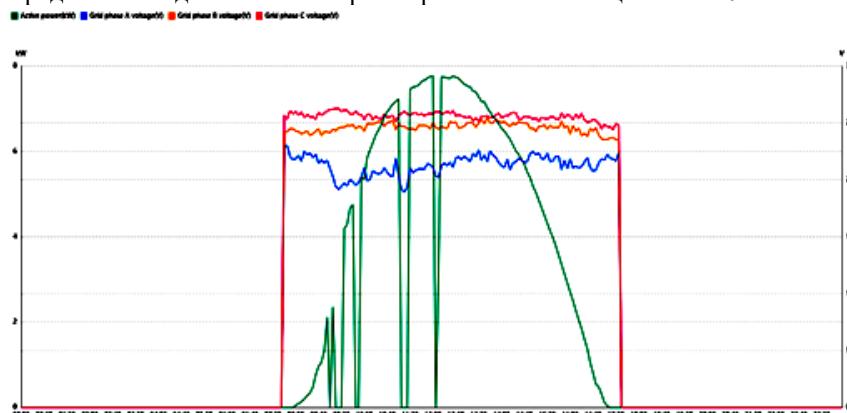


Рис.4. График мониторинга работы ФЭС мощностью 10 кВт, установленной в Хатырчинском районе, включая активную мощность (Active Power) и параметры напряжения по фазам (Grid phases A, B, C voltage)

Fig. 4. Monitoring schedule of the 10 kW PV power plant installed in Khatyrchi district including Active Power and Grid phase A, B, C voltage parameters

Как видно из рис.4, график активной мощности соответствует ожидаемому профилю работы солнечной станции, с пиковыми значениями в дневное время. При этом напряжение на фазе С (розовая линия) резко падает в определенные моменты, что указывает на перебои или перенапряжение в этой фазе, что может привести к отключению инвертора для защиты оборудования. Различия в уровнях напряжения между фазами (особенно между фазами А и С) указывают на возможную асимметрию нагрузки в сети, что может негативно влиять на работу системы.

Согласно данным об остановках ФЭС, есть определенные проблемы в локальном трансформаторе объекта, напряжение в низковольтном стороне которого выше стандарта, а фазы загружены не симметрично. Из-за этого напряжение очень часто выходит за пределы защитных уставок инвертора, что способствует остановке генерации. Учитывая проблемы сети, уставки настроек подняли до верхнего порога напряжения до 265 В, что позволяет инвертору работать до 265 В.

Основываясь на результатах мониторинга, сделана попытка расчета коэффициента доступности, рассматриваемой нами ФЭС мощностью 10 кВт. Согласно Авезову Р.Р., солнечные часы в Навоийской области колеблются в пределах 2900-3000 часов. Для расчета коэффициента доступности в нашем случае берем нижний предел данного значения – 2900 часов. Если считать, что каждая остановка системы в общем продолжалась в течение 1 часа, получим, что система простояла 613 часов за 2024 год.

В таком случае, можно будет рассчитать коэффициент доступности по вышеприведенной методике:

$$K = \frac{2900 - 613}{2900} \cdot 100\% = 78,8\%.$$

Выявлено, что станция работала исправно в течение подавляющего большинства времени месяца, и 21,2% времени было потрачено на простой из-за поломок.

4. Заключение (Conclusion)

Проведенный анализ показал, что коэффициент доступности сетевых ФЭС в большинстве случаев находится на уровне 98,5–99%, при соблюдении регулярного технического обслуживания и минимальных простоев.

В жарких и засушливых климатических условиях ключевыми факторами снижения доступности являются перегрев панелей и связанные с этим тепловые потери, что требует применения систем охлаждения или выбора оптимального угла наклона панелей.

Использование современных SCADA-систем позволяет проводить оперативный сбор и анализ данных о состоянии оборудования, что существенно сокращает время реагирования на неисправности и повышает коэффициент доступности.

Внедрение прогнозных моделей обслуживания, основанных на мониторинге состояния компонентов ФЭС, способствует предотвращению аварийных простоев и повышению производительности станций.



Таким образом, для обеспечения высокой доступности сетевых ФЭС рекомендуется оптимизировать графики обслуживания, внедрять системы предиктивного мониторинга и проводить регулярные проверки компонентов оборудования. Важно также учитывать климатические особенности региона при проектировании и эксплуатации станций, для снижения негативного влияния экстремальных погодных условий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аллаев К.Р. Современная энергетика и перспективы ее развития. -T.:Fan va texnologiya, 2021. - 923 с.
2. Кузнецов П.Н. Повышение энергетической эффективности фотоэлектрических станций, работающих в условиях неравномерной освещенности. Автореф. дисс. канд. техн. наук. -М. 2018. - 56 с.
3. Mardonova M., Choi Y. Assessment of Photovoltaic Potential of Mining Sites in Uzbekistan. Sustainability. https://consensus.app/papers/assessment-of-photovoltaic-potential-of-mining-sites-in-mardonova-choi/770d3899610954ba8861d9a3061b2ebf/?utm_source=chatgpt.
4. Raxmatov I., Samiev K., Juraev K., Mirzaev M. Analysis of the efficiency of a 300 kw solar photovoltaic system in the climate of Uzbekistan. E3S Web of Conferences. (2024). https://consensus.app/papers/analysis-of-the-efficiency-of-a-300kw-solar-photovoltaic-raxmatov-samiev/85482acd38ea568ebc1b70ffd8607117/?utm_source=chatgpt.
5. Necibia A., Bouraiou A., Ziane A., Sahouane N., Hassani S., Mostefaoui M., Dabou R., Mouhadjer S. Analytical assessment of the outdoor performance and efficiency of grid-tied photovoltaic system under hot dry climate in the south of Algeria. Energy Conversion and Management (2018). https://consensus.app/papers/analytical-assessment-of-the-outdoor-performance-and-ammar-bouraiou/f1ce30c99963558fbf339556673b9753/?utm_source=chatgpt.
6. Sahouane N., Dabou R., Ziane A., Necibia A., Bouraiou A., Rouabchia A., Mohammed B. (2019). Energy and economic efficiency performance assessment of a 28 kWp photovoltaic grid-connected system under desertic weather conditions in Algerian Sahara. Renewable Energy. https://consensus.app/papers/energy-and-economic-efficiency-performance-assessment-of-sahouane-dabou/5b4a8201404451dc8028bf98b8082b21/?utm_source=chatgpt.
7. Ramanan P., Murugavel K., Karthick A. Performance analysis and energy metrics of grid-connected photovoltaic systems. Energy for Sustainable Development (2019). https://consensus.app/papers/performance-analysis-and-energy-metrics-of-gridconnected-ramanan-murugavel/39ea90b0f3b55cc88b1ccbf827b202aa/?utm_source=chatgpt.
8. Максимов И.Г., Астапов В.Н., Второва Л.И. Надежность систем мониторинга активного оборудования. /Форум 2025 «Информационно-измерительные системы и управление. Приборы экспресс анализа нефтепродуктов».
9. <https://ru.wikipedia.org/wiki/SCADA>.
10. <https://ru.weatherspark.com>.
11. <https://natworld.info/nauki-o-prirode/osobennosti-vlazhnogo-kontinentalnogo-klimata>.
12. Авезов Р.Р., Авезова Н.Р., Матчанов Н.А., Сулейманов Ш.И., Абдукадирова Р.Д. История развития и состояние использования солнечной энергии в Узбекистане //Гелиотехника, 2012, №1, -С. 17-23.
13. <https://globalsolaratlas.info/detail?c=40.060381,65.835878,11&s=40.153862,65.952801&m=site>.

REFERENCES

1. Allayev K.R. Modern Energy and Prospects of its Development. - T.: Fan va texnologiya, 2021. p.923. (In RUSS.).
2. Kuznetsov P.N. Increase of Energy Efficiency of Photovoltaic Stations Working in Conditions of Uneven Illumination. Avtoref. Diss. Cand.tehn.nauk. M. 2018. -C.56. (In RUSS.).
3. Mardonova M., Choi Y. Assessment of Photovoltaic Potential of Mining Sites in Uzbekistan. Sustainability. https://consensus.app/papers/assessment-of-photovoltaic-potential-of-mining-sites-in-mardonova-choi/770d3899610954ba8861d9a3061b2ebf/?utm_source=chatgpt.
4. Raxmatov I., Samiev K., Juraev K., Mirzaev, M. Analysis of the efficiency of a 300kw solar photovoltaic system in the climate of Uzbekistan. E3S Web of Conferences. (2024). https://consensus.app/papers/analysis-of-the-efficiency-of-a-300kw-solar-photovoltaic-raxmatov-samiev/85482acd38ea568ebc1b70ffd8607117/?utm_source=chatgpt.
5. Necibia A., Bouraiou A., Ziane A., Sahouane N., Hassani S., Mostefaoui M., Dabou R., Mouhadjer, S. Analytical assessment of the outdoor performance and efficiency of grid-tied photovoltaic system under hot dry climate in the south of Algeria. Energy Conversion and Management (2018).



https://consensus.app/papers/analytical-assessment-of-the-outdoor-performance-and-ammar-bouraiou/f1ce30c99963558fbf339556673b9753/?utm_source=chatgpt.

6. Sahouane N., Dabou R., Ziane A., Necaibia A., Bouraiou A., Rouabchia A., Mohammed B. Energy and economic efficiency performance assessment of a 28 kWp photovoltaic grid-connected system under desertic weather conditions in Algerian Sahara. *Renewable Energy* (2019). https://consensus.app/papers/energy-and-economic-efficiency-performance-assessment-of-sahouane-dabou/5b4a8201404451dcb028bf98b8082b21/?utm_source=chatgpt.

7. Ramanan P., Murugavel K., Karthick A. Performance analysis and energy metrics of grid-connected photovoltaic systems. *Energy for Sustainable Development* (2019). https://consensus.app/papers/performance-analysis-and-energy-metrics-of-gridconnected-ramanan-murugavel/39ea90b0f3b55cc88b1ccbf827b202aa/?utm_source=chatgpt.

8. Maximov I.G., Astapov V.N., Vtorova L.I. Reliability of active equipment monitoring systems. Forum 2025 “Information-measuring systems and control. Devices of express analysis of oil products”. (In RUSS.).

9. <https://ru.wikipedia.org/wiki/SCADA>.

10. <https://ru.weatherspark.com/>.

11. <https://natworld.info/nauki-o-prirode/osobennosti-vlazhnogo-kontinentalnogo-klimata>.

12. Avezov R.R., Avezova N.R., Matchanov N.A., Suleymanov Sh.I., Abdukadirova R.D. History of Development and State of Solar Energy Utilization in Uzbekistan // *Heliotekhnika*, 2012, No. 1, P. 17-23. (In RUSS.).

13. <https://globalsolaratlas.info/dtail?c=40.060381,65.835878,11&s=40.153862,65.952801&m=site>.