

ECONOSCITECH INTEGRATION

ISSUE
6

INTERNATIONAL SCIENTIFIC
ELECTRONIC JOURNAL



TASHKENT STATE
UNIVERSITY OF ECONOMICS



American University
of Technology

Powered by Arizona State University®

ISSN: 3060-5075



Acceptance of articles

PUBLISHED EVERY MONTHLY



ARTICLE CONTRIBUTORS

**PROFESSORS-TEACHERS, SPECIALISTS
AND SCIENTIFIC RESEARCHERS.**



Google
Scholar

Academic
Resource
Index
ResearchBib

BASE

OpenAIRE

doi
Digital
Object
Identifier

OPEN ACCESS

CONTACT:



+998 94 3540880



<https://econoscitech-integration-journal.uz>



2026



EDITOR-IN-CHIEF:

Zufarova Nozima Gulamiddinovna
DSc., Dean of Tourism Faculty, TSUE

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

Makhmudov Nosir Makhmudovich
DSc., Prof., Academician

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

Suyunov Dilmurod Xolmurodovich
Doctor of Economics (DSc), Professor,

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

Allayarov Shamsiddin Amanullayevich
doctor of economics (DSC), professor

RESPONSIBLE SECRETARY:

Otaboyev Axmed Maxsudbek o'g'li
TSUE independent researcher

THE SCIENTIFIC-POPULAR
ELECTRONIC JOURNAL
"ECONOSCITECH-INTEGRATION"
HAS BEEN REGISTERED UNDER
THE NUMBER C-5669651 BY THE
AGENCY FOR INFORMATION AND
MASS COMMUNICATIONS (AOKA)
OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN,
EFFECTIVE FROM OCTOBER 9, 2024.

In accordance with Resolution No. 384/6 dated April 10, 2026, issued by the Presidium of the Supreme Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan, this journal is included in the list of recommended international scientific publications for publishing the primary research findings of doctoral dissertations in the field of Economic Sciences.

Partners: Tashkent State University of Economics / American University of Technology in Tashkent (AUT)

Electronic publication, Issue 5. 374 pages.
Approved for publication on Iyun, 2026.

Editorial Board Members:



Sharipov Kongratbay Avezimbetovich,
Doctor of Technical Sciences (DSc), Professor



Teshabayev To'liqin Zakirovich,
Doctor of Economic Sciences (DSc), Professor



Said Irandoust,
Doctor of Chemical Engineering Sciences,
Professor



Abdurakhmanova Gulnora Kalandarovna,
Doctor of Economic Sciences (DSc), Professor



Khudoykulov Sadirdin Karimovich,
Doctor of Economics, (DSc), Professor



Tokunaga Masahiro,
professor, PhD of Economics of the Faculty of
Business and Commerce



Debasis Das,
professor Department of Computer Science



Nitin Goje,
professor and Program Lead - Computer Science



Nargizakhon Shamshieva
Doctor of Economic Sciences, Professor



Rakhmonov Norim Razzakovich,
Doctor of Economic Sciences (DSc), Professor

Bayxonov Bahodirjon Tursunbayevich
Doctor of Science (DSc), Professor



Shomurodov Ravshan Tursunkulovich,
PhD, Associate Professor



Boymuratov Abduraxmat Djumayevich
Doctor of Philosophy (PhD) in Economics



Sharopova Nafosat Radjabovna
DSc, Associate Professor



Sultanova Kamila Mukhtorali Kizi
Master of Science

CONTENTS

ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ
ДОСТУПНОСТИ МАЛОМОЩНЫХ СЕТЕВЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ
МОЩНОСТЬЮ 10 КВТ: ЛОКАЛЬНАЯ И МЕЖРЕГИОНАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ В
УЗБЕКИСТАНЕ..... 10

- Авезова Нилуфар Раббанакуловна
- Матчанов Нураддин Азадович
- Шогучкаров Санжар Кодир угли
- Далмурадова Наргиза Нуриллаевна
- Кудратов Афзалхужа Рустамжон угли
- Сиддиков Хусниддин Зайниддинович

CONTENTS

ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДОСТУПНОСТИ МАЛОМОЩНЫХ СЕТЕВЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ МОЩНОСТЬЮ 10 КВТ: ЛОКАЛЬНАЯ И МЕЖРЕГИОНАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ В УЗБЕКИСТАНЕ

Авезова Нилуфар Раббанакуловна

д.т.н., проф. Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Ферганский государственный технический университет
ORCID: 0000-0002-4298-1041
Email: avezovanr@gmail.com

Матчанов Нураддин Азадович

д.т.н., проф., Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
ORCID: 0000-0001-8238-990X
Email: sirnornurisei@gmail.com

Шогучкаров Санжар Кодир угли

PhD, доц. Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
ORCID: 0000-0002-5684-9818
Email: sanjar4242@inbox.ru

Далмурадова Наргиза Нуриллаевна

PhD, Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
ORCID: 0000-0003-3373-1945
Email: ndalmuradova@gmail.com

Кудратов Афзалхужа Рустамжон угли

Исследователь, Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
ORCID: 0009-0001-9069-205X
Email: Afzalkhojakudratov@gmail.com

Сиддиков Хусниддин Зайниддинович

Исследователь, Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
ORCID: 0009-0008-6716-3513
Email: siddikovh0389@gmail.com

Аннотация: В статье выполнена локальная и межрегиональная апробация методики оценки эксплуатационной доступности маломощных сетевых солнечных фотоэлектрических станций (СФЭС) мощностью 10 кВт. В качестве методической базы использованы результаты детального годового мониторинга одной СФЭС в Хатырчинском районе Навоийской области, где было показано, что 613 зарегистрированных событий суммарной длительностью 306,5 ч следует трактовать как защитные отключения / прерывания генерации, а не как доказанные отказы оборудования. Для проверки воспроизводимости подхода рассмотрены две группы однотипных объектов: пять СФЭС в пределах Хатырчинского района и пять СФЭС, расположенных в различных регионах Узбекистана. Предложена двухуровневая схема анализа: локальная воспроизводимость оценивается по близости годовой генерации, числа остановок, коэффициентов вариации и корреляции месячных профилей, а межрегиональная переносимость — по удельной генерации и диагностическому индексу интенсивности остановок на единицу выработки. Для локальной группы установлены низкие коэффициенты вариации годовой генерации и числа остановок: 5,73 и 7,22% соответственно; средняя парная корреляция месячных профилей генерации составила 0,993, а профилей остановок — 0,942. Межрегиональное сопоставление показало, что при одинаковой мощности 10 кВт интенсивность остановок изменяется от 1,19 до 113,13 события/МВт·ч. Полученные результаты подтверждают, что эксплуатационная доступность маломощных сетевых СФЭС определяется не только установленной мощностью и солнечным ресурсом, но и качеством точки присоединения к низковольтной сети. Предложенный подход может использоваться как воспроизводимая процедура предварительного энергоаудита и ранжирования объектов распределённой солнечной генерации по сетевому обусловленному эксплуатационному риску.

Ключевые слова: сетевая фотоэлектрическая станция, эксплуатационная доступность, воспроизводимость, защитные отключения, низковольтная сеть, удельная генерация, остановки на 1 МВт ч, энергоаудит.

Abstract: This paper presents local and inter-regional validation of a methodology for assessing the operational availability of low-capacity grid-connected solar photovoltaic systems (SPVS) with an installed capacity of 10 kW. The methodological foundation is based on the results of detailed annual monitoring of a single SPVS located in the Khatyrchi District of Navoi Region, wherein it was demonstrated that 613 recorded events with a cumulative duration of 306.5 hours are to be interpreted as protective disconnections / generation interruptions rather than verified equipment failures. To evaluate the reproducibility of the proposed approach, two groups of homogeneous facilities were examined: five SPVSs within the Khatyrchi District and five SPVSs distributed across various regions of Uzbekistan. A two-tier analytical framework is proposed: local reproducibility is assessed via the proximity of annual energy yield, number of shutdowns, coefficients of variation, and cross-correlation of monthly generation profiles, whereas inter-regional transferability is evaluated by means of specific energy yield and a diagnostic index of shutdown intensity per unit of electrical output. For the local group, low coefficients of variation were established for annual energy yield and number of shutdowns - 5.73% and 7.22%, respectively; the mean pairwise Pearson correlation of monthly generation profiles was 0.993, and that of shutdown profiles was 0.942. Inter-regional comparison revealed that, at an identical rated capacity of 10 kW, the shutdown intensity ranges from 1.19 to 113.13 events per MWh. The results obtained confirm that the operational availability of low-capacity grid-connected SPVSs is determined not solely by installed capacity and solar resource, but also by the quality of the point of interconnection with the low-voltage distribution network. The proposed approach can serve as a reproducible procedure for preliminary energy auditing and ranking of distributed solar generation facilities according to network-induced operational risk.

Keywords: grid-connected photovoltaic system, operational availability, reproducibility, protective disconnections, low-voltage network, specific energy yield, shutdowns per MWh, energy audit.

ВВЕДЕНИЕ

Рост распределенной солнечной генерации повышает значение не только установленной мощности фотоэлектрических станций, но и их фактической способности непрерывно выдавать мощность в сеть в условиях реальной низковольтной инфраструктуры. Для маломощных сетевых СФЭС эксплуатационная проблема часто проявляется не как грубый отказ фотоэлектрических модулей или инвертора, а как повторяющиеся защитные отключения, вызванные параметрами внешней сети, качеством напряжения, фазной асимметрией, обратными перетоками мощности и настройками защитной логики инвертора [1, 2-8].

Вопросы интеграции распределенной фотоэлектрической генерации в низковольтные распределительные сети и связанные с этим эксплуатационные риски активно исследуются международным научным сообществом.

В работах Р. Тонкоски и Л. Лопеса детально изучено влияние высокой плотности размещения СФЭС на радиальные сети низкого напряжения. Авторы доказали, что интенсивная выдача мощности в периоды пиковой инсоляции неизбежно приводит к локальному росту напряжения в точках присоединения, что инициирует автоматическое срабатывание защитных функций инверторов (overvoltage tripping) и вынужденное ограничение генерации, снижая общую эффективность системы [3].

Группа исследователей под руководством Е. Демирока провела сравнительный анализ различных сетевых кодов и стандартов, регулирующих подключение микрогенерации к сетям низкого напряжения. Ими было показано, что жестко заданные нормативные границы защитных отключений инверторов по напряжению существенно ухудшают коэффициент эксплуатационной доступности оборудования, из-за чего параметры внешней сети становятся главным фактором недовыработки электроэнергии исправными станциями [4].

В свою очередь, в исследованиях Ф. Динга и А. Нагараджана, выполненных на базе Национальной лаборатории возобновляемой энергетики США (NREL), предложена комплексная оценка применения функций Volt-VAR контроля «умных» инверторов для стабилизации уровней напряжения. Авторами экспериментально подтверждено, что адаптивное управление реактивной мощностью позволяет минимизировать частоту защитных отключений и значительно повысить эксплуатационную доступность распределенной солнечной генерации, однако эффективность таких мероприятий тесно связана с топологией и полным сопротивлением конкретного участка сети [12].

В предыдущих исследованиях авторами была предложена дифференцированная методика оценки сетево-обусловленной эксплуатационной доступности одной маломощной СФЭС мощностью 10 кВт, установленной в Хатырчинском районе Навоийской области. На основе годового мониторинга было показано, что зарегистрированные остановки генерации не следует автоматически отождествлять с отказами оборудования. Такая интерпретация является принципиальной, поскольку ошибочное смещение сетевых событий и внутренних отказов приводит к завышенной оценке отказности исправного оборудования и к неверному выбору корректирующих мероприятий [1].

Однако анализ одной станции, даже при глубокой детализации журналов событий, оставляет вопрос о воспроизводимости результата. Для научной и инженерной убедительности важно проверить, повторяются ли выявленные закономерности на группе однотипных объектов, расположенных в сходных локальных условиях, и сохраняет ли предложенный диагностический подход свою информативность при переносе на другие регионы. Поэтому настоящая работа рассматривается как следующий этап исследования — апробация и проверка воспроизводимости методики оценки эксплуатационной доступности на группе маломощных СФЭС одинаковой номинальной мощности.

В связи с этим целью настоящей работы выполнить локальную и межрегиональную апробацию методики оценки эксплуатационной доступности маломощных сетевых СФЭС мощностью 10 кВт на основе данных мониторинга за 2024 г. Для достижения цели решены следующие задачи: сформирована двухуровневая схема проверки воспроизводимости; рассчитаны удельная генерация, число остановок и интенсивность остановок на единицу выработки; оценены коэффициенты вариации и корреляция месячных профилей для локальной группы; выполнено межрегиональное ранжирование объектов по диагностическому индексу остановок; показана связь результатов группового анализа с выводами базового исследования [1-4].

Таким образом предложенная ранее авторами методика сетево-обусловленной диагностики доступности проверяется не на одном объекте, а на двух уровнях: в пределах одной территориальной зоны и в межрегиональном сопоставлении. Такой подход позволяет отделить локально воспроизводимые закономерности работы однотипных станций от региональных различий, связанных с качеством низковольтных сетей и условиями точки присоединения.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ и результаты

Базовым объектом для разработки методики является СФЭС мощностью 10 кВт, установленная на крыше административного здания в Хатырчинском районе Навоийской области. В исследовании [1] годовая генерация этой станции составила 13894,7 кВт·ч, что соответствует 1389,5 кВт·ч/(кВт·год) при нормировании на номинальную мощность инвертора и 1 298,6 кВт·ч/(кВт·год) при нормировании на установленную пиковую мощность фотоэлектрического массива. Такой уровень выработки не указывает на грубую неработоспособность фотоэлектрической части установки (Рисунок 1).



Рисунок 1. Спутниковый снимок с видимым расположением СФЭС мощностью 10 кВт на крыше единого окна Хатырчинского района¹

Главный методический результат базового исследования состоит в разделении понятий защитного отключения, сетевобусловленной недоступности и подтвержденного отказа оборудования. Зарегистрированные 613 событий суммарной длительностью 306,5 ч были классифицированы как защитные отключения / прерывания генерации, обусловленные параметрами внешней сети и защитной логикой инвертора. При календарном фонде 8 784 ч календарная доступность составила 96,51%, а доступность в окне потенциальной солнечной генерации 2 900 ч – 89,43% (Таблица 1) [1, 3, 5-8].

Таблица 1

Ключевые результаты базового исследования, использованные для апробации методики²

Показатель	Значение	Методическая интерпретация
Годовая генерация	13894,7 кВт·ч	Нормальный уровень энергоотдачи для объекта 10 кВт
Удельная генерация по инвертору	1389,5 кВт·ч/кВт·год	Энергетическая база сопоставления с другими СФЭС 10 кВт
Число защитных отключений	613 событий	Не трактуется как доказанный отказ оборудования
Суммарная длительность остановок	306,5 ч	Потерянное время выдачи мощности
Календарная доступность	96,51%	Интегральная оценка по календарному фонду 2024 г.
Доступность в солнечном окне	89,43%	Более чувствительный показатель потерь генерации
Отключения по перенапряжению	433 события / 70,6%	Доминирующий сетевобусловленный фактор
Сценарный эффект	КД _{сол} до 93,16–95,03%	При снижении перенапряжений на 50–75%

Доминирующим фактором недоступности базовой СФЭС было перенапряжение в низковольтной сети: 433 события, или 70,6% всех защитных отключений. Сценарная оценка показала, что снижение защитных отключений по перенапряжению на 50–75% может повысить доступность в солнечном окне до 93,16–95,03%. Эти результаты образуют методическую основу настоящей статьи: если аналогичные частотные и энергетические признаки повторяются на группе объектов, можно говорить о воспроизводимости диагностического подхода [1, 8, 12, 13].

Для проверки воспроизводимости результатов рассмотрены две группы однотипных СФЭС мощностью 10 кВт. Первая группа включает пять станций, расположенных в пределах Хатырчинского района: «Единое окно», «Агробанк», «Халк банки», «УВД Хатырчи» и «10-школа», которые находятся в одной территориальной зоне и поэтому используются для оценки локальной воспроизводимости энергетической отдачи и частоты эксплуатационных остановок.

Вторая группа включает пять СФЭС мощностью 10 кВт, расположенных в разных регионах





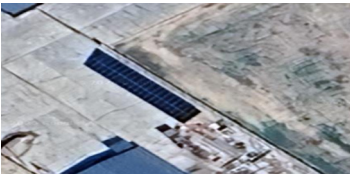
¹ Источник: авторская разработка.

² Источник: авторская разработка.

Узбекистана: Ташкент, Фергана, Навои, Каракалпакстан и Кашкадарья. Выбранная группа объектов используется для проверки межрегиональной переносимости диагностического подхода. При одинаковой установленной мощности различия в годовой генерации и числе остановок позволяют оценить влияние локальных сетевых условий и качества точки присоединения (Таблица 2).

Таблица 2

Исходные параметры сетевых СФЭС малой мощности, расположенных в пяти регионах республики³

№	Регион (район)	$P_{уст}$	Ориентация (°)	Угол наклона (°)	Средне годовые солнечные часы (ч)	Средне-годовая радиация (кВт·ч/м ² ·год)	Спутниковые фотографии станции
1	Навои, Хатирчи	10	170	40	2900-2950	1800–1900	
2	г. Ташкент	10	188	35	2750-2850	1700–1800	
3	г. Фергана	10	130	35	2750–2800	1500–1600	
4	Каракалпакстан, Тахиаташ	10	180	30	2600–2700	1800–1900	
5	Кашкадарья, Косон	10	180	40	2900-3000	1800–1950	

Необходимо отметить, что в настоящем сообщении под остановкой понимается зарегистрированное прерывание генерации / защитное отключение станции в журнале мониторинга. Для всех станций, кроме базового объекта, в представленном массиве доступны преимущественно месячная генерация и количество остановок, но не полная длительность каждого события. Поэтому межстанционная апробация выполняется по частотным и энергетическим индикаторам, а не по полной временной доступности $KD_{кал}$ и $KD_{сол}$. Такое ограничение не снижает ценность проверки воспроизводимости, но задает область применимости полученных выводов (Таблица 3) [2-4].

³ Источник: авторская разработка.

Таблица 3
Структура массива данных для проверки воспроизводимости⁴

Группа данных	Территория	Число СФЭС	Мощность	Состав данных	Назначение в статье
Локальная группа	Хатырчинский район	5	10 кВт	Месячная генерация, месячные остановки	Проверка локальной воспроизводимости
Региональная группа	5 регионов Узбекистана	5	10 кВт	Месячная генерация, месячные остановки, годовые итоги	Проверка переносимости методики
Базовый объект	Навоийская область, Хатырчинский район	1	10 кВт / 10,7 кВт	Детальный годовой мониторинг, длительности, структура причин	Методическая база и эталон классификации

Проверка воспроизводимости выполнена по двухуровневой схеме. Первый уровень – локальная воспроизводимость – направлен на установление того, насколько близко ведут себя станции одинаковой мощности, расположенные в одной территориальной зоне. Второй уровень – межрегиональная переносимость – направлен на проверку того, сохраняет ли методика диагностическую информативность при сравнении однотипных станций, работающих в разных низковольтных сетях [2-4].

Для каждой станции рассчитывалась удельная годовая генерация:

$$Y_i = E_i / P_i \quad (1),$$

где E_i - годовая генерация i -й станции, кВт·ч; P_i - номинальная мощность станции, кВт. Поскольку все рассматриваемые станции имеют мощность 10 кВт, данный показатель позволяет напрямую сопоставлять энергоотдачу объектов [2].

Для сопоставления эксплуатационных остановок введен диагностический индекс интенсивности остановок на единицу выработки:

$$I_{N_i} = N_i / (E_i / 1000) \quad (2),$$

где N_i - число зарегистрированных остановок за год, $E_i / 1000$ - годовая выработка, выраженная в МВт·ч. Размерность индекса – остановок/МВт·ч. Этот показатель удобен тем, что учитывает не только частоту остановок, но и фактический объем произведенной энергии [2,3].

Для локальной группы дополнительно рассчитывались коэффициенты вариации годовой генерации и числа остановок:

$$CV_E = \sigma_E / \bar{E} \cdot 100\% \quad (3),$$

$$CV_N = \sigma_N / \bar{N} \cdot 100\% \quad (4),$$

где σ_E и σ_N - стандартные отклонения по группе станций; \bar{E} и \bar{N} - средние значения годовой генерации и числа остановок. Низкие значения коэффициентов вариации указывают на повторяемость результатов в пределах территориальной группы.

Для оценки повторяемости сезонных профилей использована парная корреляция месячных рядов генерации и остановок. Среднее значение парной корреляции по группе рассматривается как дополнительный признак воспроизводимости. Высокая корреляция генерации отражает близость сезонной солнечной динамики и эксплуатационных режимов, а высокая корреляция остановок указывает на повторяемость сетевых-обусловленных условий, влияющих на работу однотипных станций (Таблица 4) [2, 4].

Таблица 4
Показатели, применяемые для проверки воспроизводимости методики⁵

Показатель	Смысл	Интерпретация
CV_E	Коэффициент вариации годовой генерации	Низкое значение указывает на близкую энергоотдачу станций
CV_N	Коэффициент вариации числа остановок	Низкое значение указывает на повторяемость частоты прерываний

⁴ Источник: авторская разработка.

⁵ Источник: авторская разработка.

r_E	Парная корреляция месячных профилей генерации	Высокое значение подтверждает сезонную воспроизводимость
r_N	Парная корреляция месячных профилей остановок	Высокое значение подтверждает локально повторяющиеся сетевые условия
I_N	Остановки на 1 МВт·ч	Диагностический индекс сетевых-обусловленного эксплуатационного риска

Локальная апробация выполнена на пяти СФЭС мощностью 10 кВт, расположенных в пределах Хатырчинского района. Такое сопоставление позволяет проверить, является ли базовая станция единичным частным случаем или ее эксплуатационная картина повторяется на других объектах аналогичной мощности и близкого территориального положения (Таблица 5; Рисунок 2) [1].

Таблица 5
Среднемесячная генерация пяти СФЭС Хатырчинского района, кВт·ч⁶

Месяц	Единое окно	Агробанк	Халк банки	УВД Хатырчи	10-школа
Янв	613	570	660	590	680
Фев	651	610	720	640	710
Мар	1198	1100	1320	1160	1260
Апр	1326	1220	1480	1250	1390
Май	1670	1520	1820	1580	1710
Июн	1788	1620	1700	1720	1600
Июл	1895	1780	1980	1830	1750
Авг	1657	1520	1780	1600	1640
Сен	963	820	940	850	900
Окт	992	910	1120	960	1040
Ноя	741	690	830	710	790
Дек	401	370	480	390	440

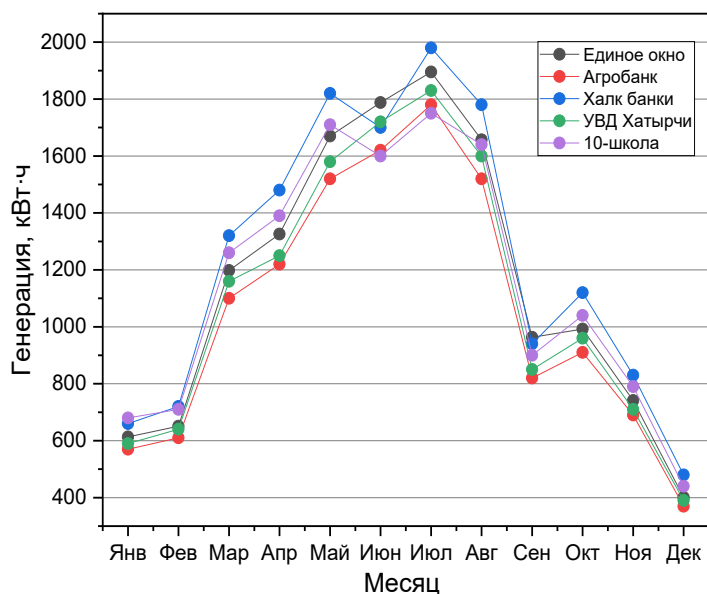


Рисунок 2. Среднемесячная генерация пяти СФЭС Хатырчинского района⁷

Как видно из Табл. 5 и Рис. 2, месячные профили генерации пяти станций имеют близкий сезонный характер (Таблица 6).

⁶ Источник: авторская разработка.

⁷ Источник: авторская разработка.

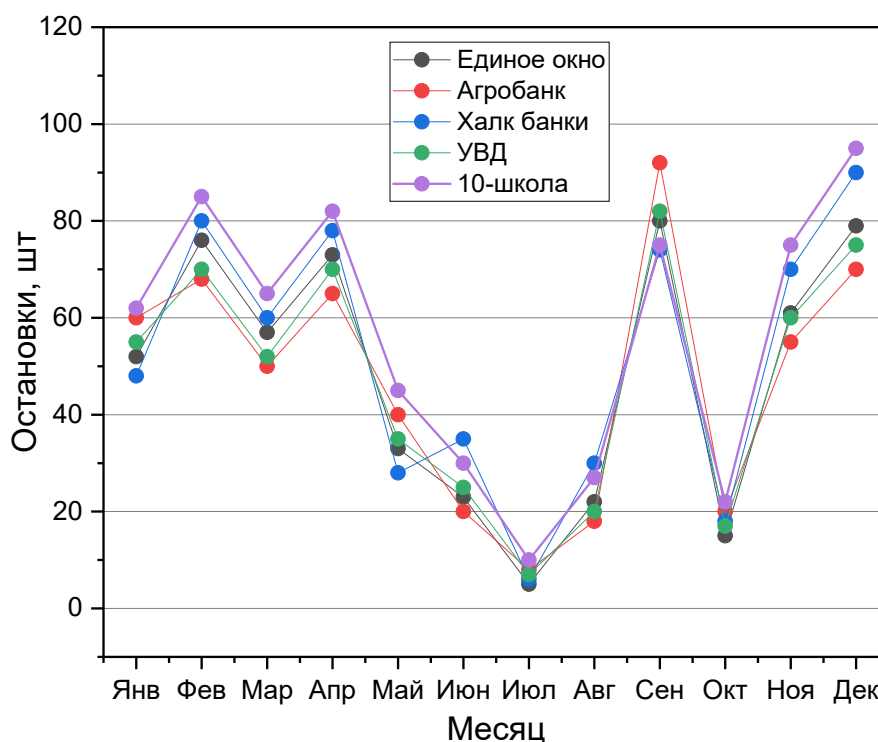
Таблица 6

Помесячное число остановок пяти СФЭС Хатырчинского района, шт.⁸

Месяц	Единое окно	Агробанк	Халк банки	УВД Хатырчи	10-школа
Янв	52	60	48	55	62
Фев	76	68	80	70	85
Мар	57	50	60	52	65
Апр	73	65	78	70	82
Май	33	40	28	35	45
Июн	23	20	35	25	30
Июл	5	8	6	7	10
Авг	22	18	30	20	27
Сен	117	92	74	82	75
Окт	15	20	18	17	22
Ноя	61	55	70	60	75
Дек	79	70	90	75	95

Максимальная генерация в большинстве случаев приходится на летний период, а минимальная – на зимние месяцы. Различия между объектами связаны с локальными особенностями установки, состоянием точки присоединения, возможными затенениями и режимом потребления здания, однако общий профиль выработки остается воспроизводимым [2].

Данные Табл. 6 и Рис. 3 показывают, что число остановок также имеет повторяющийся характер: у всех станций наблюдаются минимальные значения в июле и более высокие значения в зимне-весенний и осенний периоды. Такой результат важен для интерпретации: близость профилей остановок у разных станций одного района снижает вероятность того, что выявленные события обусловлены только индивидуальной неисправностью одного объекта. Более вероятной является общая сетевая обусловленная природа эксплуатационных прерываний (Рисунок 3; Таблица 7, 8) [1, 3, 8].

Рисунок 3. Помесячные остановки пяти СФЭС Хатырчинского района⁹

8 Источник: авторская разработка.

9 Источник: авторская разработка.

Таблица 7

Годовые показатели локальной группы СФЭС Хатырчинского района¹⁰

Объект	Годовая генерация, кВт·ч	Удельная генерация, кВт·ч/кВт	Остановки, шт.	I_N , остановок/МВт·ч
Единое окно	13895	1389,5	613	44,1
Агробанк	12730	1273,0	566	44,5
Халк банки	14830	1483,0	617	41,6
УВД Хатырчи	13280	1328,0	568	42,8
10-школа	13910	1391,0	673	48,4

Таблица 8

Статистические признаки локальной воспроизводимости¹¹

Показатель	Значение	Интерпретация
Средняя годовая генерация	13729,0 кВт·ч	Характеризует типовой уровень энергоотдачи группы
Диапазон годовой генерации	12730 – 14830 кВт·ч	Разброс находится в пределах, допустимых для однотипных объектов
CV_E	5,73%	Низкий разброс годовой генерации
Среднее число остановок	607,4 событий/год	Характеризует локально повторяющийся уровень прерываний
CV_N	7,22%	Низкий разброс числа остановок
Средний I_N	44,27 остановок/МВт·ч	Локальный диагностический уровень сетево-обусловленного риска
CV_I	5,79%	Подтверждает близость частотного риска с учетом выработки
Средняя корреляция генерации	0,993	Высокая повторяемость месячных профилей генерации
Средняя корреляция остановок	0,942	Высокая повторяемость месячных профилей остановок

Итоговые показатели локальной группы подтверждают воспроизводимость результатов в пределах Хатырчинского района. Средняя годовая генерация пяти станций составила 13729 кВт·ч, коэффициент вариации генерации 5,73%. Среднее число остановок составило 607,4 события в год, коэффициент вариации 7,22%. Дополнительно высокая средняя парная корреляция месячных профилей генерации (0,993) и остановок (0,942) показывает, что и энергетическая отдача, и структура эксплуатационных прерываний повторяются на группе однотипных объектов [1].

Таким образом, локальная апробация подтверждает, что базовая СФЭС не является статистическим выбросом среди аналогичных станций района. Напротив, ее годовая генерация, число остановок и индекс I_N находятся вблизи средних значений локальной группы. Это усиливает научную достоверность исходного вывода: проблема недоступности имеет не только индивидуальный, но и локально воспроизводимый сетевой характер [1].

Второй уровень апробации направлен на проверку переносимости методики при сравнении СФЭС одинаковой мощности, расположенных в различных регионах Узбекистана. В отличие от локальной

¹⁰ Источник: авторская разработка.

¹¹ Источник: авторская разработка.

группы, где объекты находятся в сходной территориальной зоне, региональное сравнение позволяет выявить различия, связанные с состоянием низковольтных сетей, структурой нагрузки, качеством точки присоединения и режимом работы распределенной генерации (Таблица 9; Рисунок 4) [3, 4].

Таблица 9

Среднемесячная генерация СФЭС мощностью 10 кВт по регионам, кВт·ч¹²

Месяц	Ташкент	Фергана	Навои	Каракалпакстан	Кашкадарья
Янв	750.7	340.9	613.5	400.1	340.5
Фев	792.1	458.7	651.0	665.6	763.2
Мар	1333.6	764.6	1197.7	872.8	1304.8
Апр	1537.5	1117.3	1325.9	1318.7	1468.6
Май	1823.5	1160.7	1669.8	1294.6	1866.0
Июн	1352.5	973.3	1788.1	1400.3	1797.7
Июл	1376.5	842.4	1895.3	1389.4	1840.5
Авг	1848.3	1327.9	1656.7	1334.1	1701.7
Сен	1615.1	939.6	963.4	1159.9	1383.9
Окт	1160.8	264.3	991.5	881.4	1133.5
Ноя	824.8	294.4	740.8	776.9	824.6
Дек	685.7	222.9	401.1	381.4	738.3

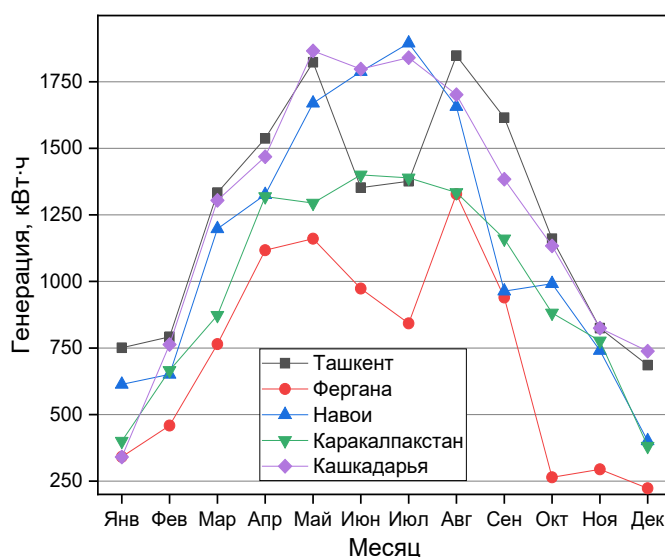


Рисунок 4. Среднемесячная генерация СФЭС мощностью 10 кВт, расположенных в пяти регионах РУз.¹³

Данные Табл. 9 и Рис. 4 показывают, что месячные профили генерации в регионах сохраняют общий сезонный характер, однако годовой уровень выработки существенно различается. Наибольшая годовая генерация зафиксирована в Кашкадарье и Ташкенте, тогда как минимальное значение наблюдается в Фергане. Следовательно, даже при одинаковой номинальной мощности 10 кВт фактическая энергоотдача станции зависит от региональных условий, режима эксплуатации, возможных простоев, локального затенения и качества подключения (Таблица 10; Рисунок 5) [2].

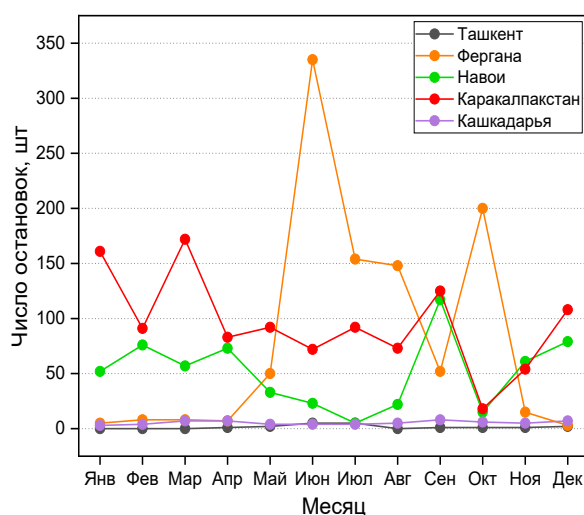
¹² Источник: авторская разработка.

¹³ Источник: авторская разработка.

Таблица 10

Помесячное число остановок СФЭС мощностью 10 кВт по регионам, шт.¹⁴

Месяц	Ташкент	Фергана	Навои	Каракалпакстан	Кашкадарья
Янв	0	5	52	161	3
Фев	0	8	76	91	4
Мар	0	8	57	172	7
Апр	1	7	73	83	7
Май	2	50	33	92	4
Июн	5	335	23	72	4
Июл	5	154	5	92	4
Авг	0	148	22	73	5
Сен	1	52	117	125	8
Окт	1	200	15	18	6
Ноя	1	15	61	54	5
Дек	2	3	79	108	7

Рисунок 5. Помесячное число остановок СФЭС мощностью 10 кВт по пяти регионам Узбекистана¹⁵

Как видно из Табл. 10 и Рис. 5, различия по числу остановок между регионами существенно выше, чем различия по сезонной структуре генерации. Наиболее малое число остановок зафиксировано в Ташкенте и Кашкадарье, тогда как Фергана и Каракалпакстан характеризуются значительно более высокой частотой эксплуатационных прерываний. Навои занимает промежуточное положение и соответствует уровню, выявленному при детальной диагностике базовой станции (Таблица 11, 12; Рисунок 6) [3,8].

Таблица 11

Региональное сопоставление годовых показателей СФЭС мощностью 10 кВт¹⁶

Регион	Годовая генерация, кВт·ч	Удельная генерация, кВт·ч/кВт	Остановки, шт.	I_N , остановок/МВт·ч	Категория
Ташкент	15100.9	1510,1	18	1.2	низкая
Фергана	8707.0	870,7	985	113.1	критически высокая
Навои	13894.8	1389,5	613	44.1	умеренная
Каракалпакстан	11875.1	1187,5	1 141	96.1	высокая
Кашкадарья	15163.3	1516,3	64	4.2	низкая

14 Источник: авторская разработка.

15 Источник: авторская разработка.

16 Источник: авторская разработка.

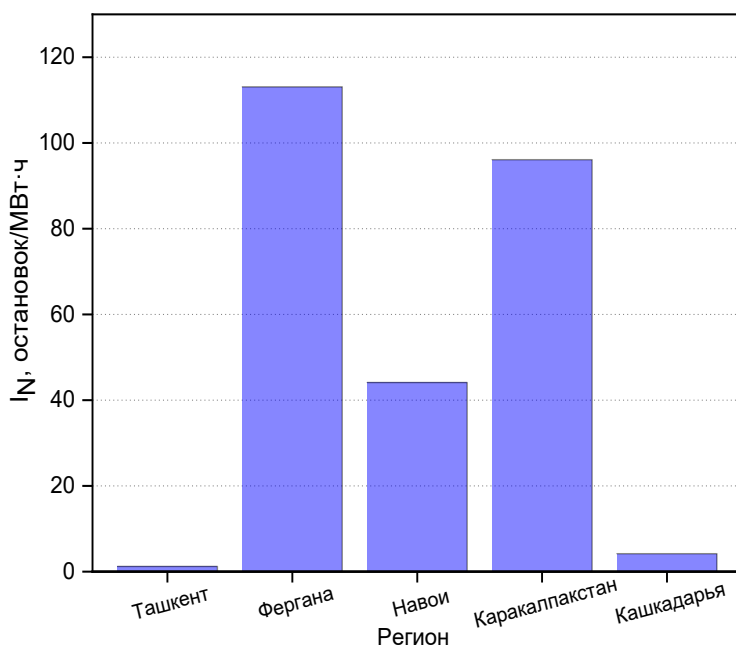


Рисунок 6. Интенсивность остановок на единицу выработки по регионам¹⁷

Таблица 12

Статистические признаки межрегиональной переносимости методики¹⁸

Показатель	Значение	Научная интерпретация
Диапазон годовой генерации	8707,0–15163,3 кВт·ч	Энергоотдача различается даже при одинаковой мощности
Диапазон числа остановок	18–1141 событий	Разброс остановок значительно выше разброса генерации
Диапазон I_N	1,19–113,13 остановок/МВт·ч	Показывает различие сетевых-обусловленного риска более чем на порядок
CV_E по регионам	21,00%	Региональная генерация имеет умеренный разброс
CV_N по регионам	91,27%	Остановки имеют очень высокий межрегиональный разброс
CV_I по регионам	99,51%	Индекс I_N хорошо выявляет неоднородность точек присоединения
Средняя корреляция генерации	0,879	Сезонные профили генерации остаются похожими, но не идентичными

Межрегиональное сопоставление демонстрирует принципиально важный результат: одинаковая установленная мощность 10 кВт не гарантирует одинаковую эксплуатационную доступность. При близких или даже высоких значениях годовой генерации станции могут иметь совершенно разную интенсивность остановок. Например, Ташкент и Кашкадарья показывают низкий уровень I_N - 1,19 и 4,22 остановки/МВт·ч соответственно, тогда как Фергана и Каракалпакстан имеют 113,13 и 96,08 остановки/МВт·ч. Навои, являющийся регионом базового объекта, занимает промежуточное положение с 44,12 остановки/МВт·ч.

Полученный результат подтверждает диагностическую ценность индекса I_N . Он позволяет выявить объекты, которые по годовой генерации могут казаться работоспособными, но по частоте остановок

¹⁷ Источник: авторская разработка.

¹⁸ Источник: авторская разработка.

демонстрируют повышенный сетевое-обусловленный риск. В этом смысле индекс остановок на единицу выработки является удобным инструментом предварительного ранжирования СФЭС, требующих более глубокого энергоаудита точки присоединения [2, 3].

Локальная группа Хатырчинского района показывает, что результаты базового исследования воспроизводятся на нескольких однотипных объектах. Низкий коэффициент вариации годовой генерации (5,73%) свидетельствует о сопоставимой энергетической отдаче станций, а низкий коэффициент вариации числа остановок (7,22%) - о близком уровне эксплуатационных прерываний. Особенно важен показатель I_N : у всех пяти станций он находится в узком диапазоне примерно 41,6-48,4 остановки/МВт·ч. Это означает, что с учетом фактической выработки частотный риск остановок также является близким.

Такой результат переводит исходное наблюдение из формата «одна станция часто отключалась» в формат воспроизводимой локальной закономерности. Если несколько станций одинаковой мощности, расположенных в одной территориальной зоне, демонстрируют близкий профиль генерации и остановок, то корректнее рассматривать проблему как характеристику сети и условий подключения, а не как индивидуальный отказ одного инвертора или одного фотоэлектрического массива.

Региональная группа, напротив, демонстрирует сильную неоднородность по числу остановок и индексу I_N . Это показывает, что диагностическая методика не просто воспроизводит локальный результат, а позволяет выделять различия между точками присоединения в разных регионах. В условиях распределенной генерации такой результат особенно важен: сетевые ограничения могут быть невидимы при анализе только установленной мощности и годовой генерации, но становятся очевидными при анализе частоты остановок [3, 8].

Высокие значения I_N в Фергане и Каракалпакстане указывают на необходимость более детальной диагностики: проверки параметров напряжения, фазной асимметрии, режима трансформаторной подстанции, длины и сечения линии, уставок инвертора и возможных обратных перетоков мощности. Низкие значения I_N в Ташкенте и Кашкадарье, напротив, позволяют рассматривать эти объекты как примеры более благоприятных условий сетевого подключения [7, 8, 12, 13].

На основе регионального сравнения целесообразно использовать предварительную шкалу интенсивности остановок: до 10 остановок/МВт·ч – низкий уровень эксплуатационного риска; 10–50 остановок/МВт·ч – умеренный уровень; 50–100 остановок/МВт·ч – высокий уровень; выше 100 остановок/МВт·ч – критически высокий уровень. Эта шкала не является нормативной и должна уточняться по мере накопления данных, однако она удобна для первичного энергоаудита группы маломощных СФЭС (Таблица 13) [3, 11].

Таблица 13

Предварительная шкала диагностического ранжирования СФЭС по индексу I_N ¹⁹

Диапазон индекса	Категория	Рекомендуемое действие
$I_N \leq 10$	низкая	Объект работает устойчиво по частотному признаку; достаточно регулярного мониторинга
$10 < I_N \leq 50$	умеренная	Требуется анализ причин остановок при плановом энергоаудите
$50 < I_N \leq 100$	высокая	Необходима проверка точки присоединения и журналов напряжения
$I_N > 100$	критически высокая	Требуется приоритетная диагностика сети, инвертора и уставок защиты

На основе выполненной апробации предложен обобщенный порядок применения методики к группе маломощных сетевых СФЭС. Он ориентирован на ситуацию, когда у эксплуатирующей организации имеется массив данных по нескольким станциям, но не для всех объектов доступны полные журналы длительности и причин событий (Таблица 14) [9-11].

¹⁹ Источник: авторская разработка.

Таблица 14
Порядок применения методики к группе однотипных СФЭС²⁰

Этап	Содержание	Ожидаемый результат
1. Формирование группы	Выбор станций одинаковой или близкой мощности, работающих в сопоставимый период	Исключение некорректного сравнения объектов разного класса
2. Расчет годовой генерации	Определение E_{year} и удельной генерации Y_i	Сравнение энергетической отдачи объектов
3. Расчет числа остановок	Определение N_i по журналам мониторинга	Оценка частоты эксплуатационных прерываний
4. Расчет I_N	Нормирование числа остановок на фактическую выработку	Получение диагностического индекса остановок/МВт·ч
5. Локальная проверка	Расчет CV_E , CV_N , корреляции месячных профилей	Оценка воспроизводимости в одной территориальной зоне
6. Региональное ранжирование	Сопоставление I_N между регионами	Выявление объектов с высоким сетевым риском
7. Углубленная диагностика	Получение длительностей событий, напряжений и причин отключений	Расчет $KD_{\text{кап}}$, $KD_{\text{сол}}$, $KD_{\text{сет}}$ и классификация событий
8. Корректирующие меры	Настройка инвертора, балансировка фаз, регулирование напряжения, модернизация линии, СНЭ	Снижение сетевых-обусловленной недоступности

Предложенная последовательность позволяет перейти от анализа одной станции к управлению портфелем маломощных объектов. На первом уровне выявляются станции с повышенным частотно-энергетическим риском, а на втором уровне для них выполняется детальная классификация причин недоступности. Такой подход особенно полезен для регионов с быстрым ростом распределенной солнечной генерации, где эксплуатирующая организация должна быстро определить, какие точки присоединения требуют первоочередного внимания [9-13].

ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Выполненное исследование в рамках настоящей статьи позволило сформировать и апробировать двухуровневый подход к проверке воспроизводимости методики оценки эксплуатационной доступности маломощных сетевых СФЭС мощностью 10 кВт. В отличие от простого сравнения годовой выработки, предложенный подход учитывает частоту эксплуатационных остановок и нормирует ее на фактическую выработку станции, что позволяет выявлять сетевые-обусловленные признаки эксплуатационного риска.

Локальная апробация на пяти СФЭС Хатырчинского района показала высокую повторяемость энергетических и частотных показателей. Средняя годовая генерация составила 13729 кВт·ч, коэффициент вариации генерации 5,73%, среднее число остановок 607,4 события в год, коэффициент вариации остановок 7,22%, которая подтверждает, что базовый объект не является единичным выбросом, а отражает локально воспроизводимую эксплуатационную картину. При этом средняя парная корреляция месячных профилей генерации в локальной группе составила 0,993, а профилей остановок 0,942. Следовательно, не только сезонная генерация, но и структура эксплуатационных прерываний имеет повторяющийся характер в пределах одной территориальной зоны.

Межрегиональная апробация показала, что при одинаковой мощности 10 кВт годовая генерация изменяется от 8707,0 до 15163,3 кВт·ч, а число остановок – от 18 до 141 событий в год, которая доказывает, что установленная мощность станции сама по себе не определяет эксплуатационную доступность. Введенный авторами диагностический индекс I_N позволяет сопоставлять остановки с фактической выработкой станции. По регионам значение I_N изменяется от 1,19 остановки/МВт·ч в Ташкенте до 113,13 остановки/МВт·ч в Фергане. Такой диапазон подтверждает существенную неоднородность сетевых условий и качества точек присоединения в республике.

Таким образом эксплуатационная доступность маломощных сетевых СФЭС должна оцениваться не только по годовой генерации, но и по структуре остановок, причинам защитных отключений и качеству

20 Источник: авторская разработка.

внешней сети. Частотный индекс I_N может использоваться как первый уровень диагностики, а полный расчет $KD_{\text{канал}}$, $KD_{\text{сол}}$ и $KD_{\text{сет}}$ – как второй уровень углубленного энергоаудита [1, 3, 9-11].

ФОЙДАЛАНИЛГАН АДАБИЁТЛАР РЎЙХАТИ

1. Н.Р. Аvezова, С.К. Шогучкаров, Кулматов Х.Х., А.Р. Кудратов. А.Р. Рахматов, Х.З. Сиддиқов. Модель причинно-ориентированной оценки эксплуатационной доступности маломощных сетевых СФЭС на основе мониторинга, сетевых ограничений и защитной логики инвертора. *Алтернативная энергетика*, №2-2026 г. С. 27-46.

2. Н.Р. Аvezова, С.К. Шогучкаров, А.Р. Кудратов. А.Е. Асадов. Эксплуатационная устойчивость маломощных сетевых солнечных фотоэлектрических станций в различных регионах Узбекистана. *Проблемы информатики и Энергетики*, №4-2025 г. С. 102-115.

3. Tonkoski R., Lopes L.A.C. Impact of active power curtailment on PV inverter lifetime // *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. – 2012. – Vol. 3. – No. 2. – Pp. 156-166.

4. Demirok E., Caserza González P., Frederksen K. H. B., Sera D., Teodorescu R., Rodriguez P. Local reactive power control methods for overvoltage prevention of distributed solar inverters in low-voltage grids // *IEEE Journal of Photovoltaics*. – 2011. – Vol. 1. – No. 2. – Pp. 174-182.

5. IEC 61727:2004. Photovoltaic (PV) systems — Characteristics of the utility interface. International Electrotechnical Commission, 2004.

6. IEC 62116:2014. Utility-interconnected photovoltaic inverters — Test procedure of islanding prevention measures. International Electrotechnical Commission, 2014.

7. EN 50549-1:2019. Requirements for generating plants to be connected in parallel with distribution networks — Part 1: Connection to a LV distribution network. CENELEC, 2019.

8. EN 50160:2022+A1:2025. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks. CENELEC, 2025.

9. IEC 62446-1:2016+A1:2018. Photovoltaic systems — Requirements for testing, documentation and maintenance — Part 1: Grid connected systems — Documentation, commissioning tests and inspection. IEC, 2018.

10. IEC 62446-2:2020. Photovoltaic systems — Requirements for testing, documentation and maintenance — Part 2: Grid connected systems — Maintenance of PV systems. IEC, 2020.

11. ISO 50002-1:2025. Energy audits — Part 1: General requirements with guidance for use. International Organization for Standardization, 2025.

12. Ding F., Nagarajan A., Chakraborty S., Baggu M. Photovoltaic Impact Assessment of Smart Inverter Volt-VAR Control on Distribution System Conservation Voltage Reduction and Power Quality. NREL Technical Report NREL/TP-5D00-67296, 2016.

13. Gui Y., Nainar K., Bendtsen J. et al. Voltage Support With PV Inverters in Low-Voltage Distribution Networks: An Overview. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2024, 12(2), pp. 1503–1522.

Proofreader: Xondamir Ismoilov
Layout and Designer: Oloviddin Sobir ugli

2026. № 6

© When materials are reproduced, the ECONOSCITECH-INTEGRATION journal must be cited as the source. Authors are responsible for the accuracy of the information in materials and advertisements published in the journal. Editorial opinions may not always align with those of the authors. Submitted materials will not be returned to the editorial office.

To publish articles in this journal, you may submit articles, advertisements, stories, and other creative materials through the following links. Materials and advertisements are published on a paid basis.

You may subscribe to the journal at any time using the following details. Once subscribed, please send a screenshot or photo of your payment confirmation to our Telegram page @iqtisodiyot_77. Based on this, we will send the latest issue of the journal to your address each month.

Our address: Tashkent city, Yunusobod district, 19th block, House 17.

