



UO‘K 620.92; 620.98

doi.10.70769/2181-284.ME.2(23).2026.8

O‘ZBEKISTON IQLIM SHAROITIDA TARMOQQA ULANGAN QUYOSH FOTOELEKTRIK STANSIYALARI INVERTORLARINING ISHONCHLILIGINI MONITORING QILISH VA OSHIRISHNING GEO-ADAPTIV METODIKASI

Avezova Nilufar Rabbanaqulovna¹- t.f.d., prof.,
<https://orcid.org/0000-0002-4298-1041> e-mail: avezovanr@gmail.com

Mirzabaev Akram Maxkamovich² – t.f.d., prof.,
<https://orcid.org/0000-0002-5223-7160> e-mail: mirzabaev.akram@gmail.ru

Kulmatov Xayrullo Xabibullaevich¹- PhD, kat.i.x.,
<https://orcid.org/0009-0008-5504-4875> e-mail: hayrullo05051986@gmail.com,

Asadov Axmadbek Erkinovich²- mustaqil tadqiqotchi
<https://orcid.org/0000-0003-3844-8866> e-mail: akhmadbek5@gmail.com

¹Farg‘ona davlat texnika universiteti, Farg‘ona shahar, O‘zbekiston

²“Toshkent irrigatsiya va qishloq xo‘jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti” milliy
tadqiqot universiteti, Toshkent shahar, O‘zbekiston

Annotatsiya. Kirish. Maqolada O‘zbekiston iqlim sharoitida tarmoqqa ulangan quyosh fotoelektrik stansiyalari invertorlarining ishonchliligini monitoring qilish va oshirish uchun geo-adaptiv metodika taklif etilgan. Unda invertorlarning ishdan chiqishiga iqlimiy, elektr va ekspluatatsion omillarning birgalikdagi ta’siri tahlil qilinadi hamda “ishonchlilik–chidamlilik” ko‘rsatkichiga asoslangan yondashuv ishlab chiqiladi. Tadqiqot natijalari issiq va changli hududlarda invertorlar degradatsiyasi tezroq kechishini va prediktiv monitoring bunday xavflarni kamaytirishda samarali bo‘lishi mumkinligini ko‘rsatadi.

Usul va materiallar. Tadqiqotda ilmiy adabiyotlar, ekspluatatsion kuzatuvlar va statistik ma’lumotlar tahlil qilindi. Klassik ishonchlilik baholash usullari, Weibull taqsimoti asosidagi model, SCADA/IoT telemetriyasi, mashinaviy o‘rganish algoritmlari va raqamli egizak yondashuvi metodologik asos sifatida qo‘llanildi. Taklif etilgan geo-adaptiv metodika iqlim, tarmoq va ekspluatatsion ko‘rsatkichlarni yagona xavf baholash tizimida birlashtiradi.

Natijalar Tahlil shuni ko‘rsatdiki, yarim qurg‘oqchil iqlimda invertorlar samaradorligi yiliga 0,8-1,5 % ga kamayadi, issiq cho‘l hududlarida esa yillik ishdan chiqish chastotasi 6-7 % gacha yetadi. Nosozliklarning taxminan 65 % i kuch elektronikasining termik zo‘riqishi bilan bog‘liq. Geo-adaptiv metodika asosida har bir stansiya uchun raqamli xavf profili shakllantirish, prognozli texnik xizmatni yo‘lga qo‘yish va favqulodda to‘xtashlarni kamaytirish imkoniyati asoslandi.

Xulosa. Tarmoqqa ulangan SFES invertorlarining ishonchliligi O‘zbekiston sharoitida iqlim, elektr tarmog‘i sifati va issiqlik rejimlariga kuchli bog‘liq ekani aniqlandi. Taklif etilgan geo-adaptiv monitoring metodikasi ishonchlilikni baholashni aniqroq qilish, texnik xizmat ko‘rsatishni optimallashtirish va generatsiya yo‘qotishlarini kamaytirish uchun amaliy asos bo‘lib xizmat qiladi. Ushbu yondashuv kelgusida real obyektlarda pilot sinovdan o‘tkazilishi maqsadga muvofiq.

Kalit so‘zlar: tarmoqqa ulangan fotoelektr stansiya, sanoat sovutish majmuasi, energiya samaradorligi, elektr energiyasi sifati, THD, SCADA/ASU TP, yuklamalarni ustuvorlashtirish, Farg‘ona vodiysi.

Дата поступления: 13.05.2026. **После обработки:** 10.06.2026 **Принято печать:** 22.06.2026

For citation: Avezova N.R., Mirzabaev A.M., Kulmatov Kh.Kh., Asadov A.E. A geo-adaptive methodology for monitoring and enhancing the reliability of grid-connected photovoltaic inverters under Uzbekistan’s climatic conditions. *Alternative energy*. 2026. 2(23). pp. 86-100. (In Rus)



УДК 620.92; 620.98

ГЕО-АДАПТИРОВАННАЯ МЕТОДИКА МОНИТОРИНГА И ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ ИНВЕРТОРОВ СЕТЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ УЗБЕКИСТАНА

Авезова Нилуфар Раббанакуловна¹ - доктор технических наук, профессор,

<https://orcid.org/0000-0002-4298-1041> e-mail: avezovanr@gmail.com

Мирзабаев Акрам Махкамович² - доктор технических наук, профессор,

<https://orcid.org/0000-0002-5223-7160> e-mail: mirzabaev.akram@gmail.ru

Кулматов Хайрулло Хабибуллаевич¹ - PhD, с.н.с.,

<https://orcid.org/0009-0008-5504-4875> e-mail: hayrullo05051986@gmail.com,

Асатов Ахмадбек Эркинович² – независимый исследователь

<https://orcid.org/0000-0003-3844-8866> e-mail: akhmadbek5@gmail.com

¹Ферганский государственный технический университет, г. Фергана, Узбекистан

²Национальный исследовательский университет «ТИИИМСХ», г. Ташкент, Узбекистан

Аннотация. Введение. В статье предложена геоадаптивная методика мониторинга и повышения надёжности инверторов сетевых солнечных фотоэлектрических станций в климатических условиях Узбекистана. Рассматривается совместное влияние климатических, электрических и эксплуатационных факторов на работоспособность инверторов и обосновывается подход на основе интегрального показателя «надёжность–устойчивость». Показано, что в жарких и запылённых регионах деградация и отказы инверторов происходят интенсивнее, а предиктивный мониторинг способен снизить риск простоев.

Методы и материалы. В работе использованы аналитический обзор литературы, эксплуатационные наблюдения и статистические данные по отказам инверторов. В качестве методической основы применены классические методы оценки надёжности, модель Вейбулла, телеметрия SCADA/IoT, цифровые двойники и алгоритмы машинного обучения. Предложенная геоадаптивная методика объединяет климатические, сетевые и эксплуатационные параметры в единую систему оценки риска.

Результаты. Установлено, что в полусухом климате деградация КПД инверторов составляет 0,8-1,5 % в год, а в жарком пустынном климате частота отказов достигает 6-7% в год. Около 65 % отказов связаны с тепловыми перегрузками силовых компонентов. Показано, что применение геоадаптивной методики позволяет формировать цифровой профиль риска для каждой станции, повышать точность прогнозирования отказов и оптимизировать профилактическое обслуживание.

Заключение. Надёжность сетевых СФЭС в условиях Узбекистана определяется совокупным влиянием климата, качества электроснабжения и тепловых режимов работы силовой электроники. Предложенная геоадаптивная методика создаёт научно-практическую основу для более точной оценки риска, сокращения аварийных остановок и повышения эффективности технического обслуживания. Перспективным следующим этапом является пилотная апробация подхода на реальных объектах.

Ключевые слова: сетевая фотоэлектрическая станция, промышленный холодильный комплекс, энергоэффективность, качество электроэнергии, THD, приоритизация нагрузок, SCADA/АСУ ТП, Ферганская долина.



UDC 620.92; 620.98

A GEO-ADAPTIVE METHODOLOGY FOR MONITORING AND ENHANCING THE RELIABILITY OF GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC INVERTERS UNDER UZBEKISTAN'S CLIMATIC CONDITIONS

Avezova Nilufar Rabbanakulovna¹- DSc, Prof.,

<https://orcid.org/0000-0002-4298-1041> e-mail: avezovanr@gmail.com

Mirzabaev Akram Maxkamovich² – DSc, Prof.,

<https://orcid.org/0000-0002-5223-7160> e-mail: mirzabaev.akram@gmail.ru

Kulmatov Xayrullo Xabibullaevich¹- PhD, S.R.,

<https://orcid.org/0009-0008-5504-4875> e-mail: hayrullo05051986@gmail.com,

Asadov Axmadbek Erkinovich²- researcher

<https://orcid.org/0000-0003-3844-8866> e-mail: akhmadbek5@gmail.com

¹Fergana State Technical University, Fergana, Uzbekistan

²National Research University “Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers”, Tashkent, Uzbekistan

Abstract. Introduction. The paper proposes a geo-adaptive methodology for monitoring and improving the reliability of grid-connected photovoltaic inverters under the climatic conditions of Uzbekistan. It considers the combined impact of climatic, electrical, and operational factors on inverter performance and substantiates an approach based on a composite “reliability–resilience” indicator. The study shows that degradation and failures develop more intensively in hot and dusty regions, while predictive monitoring can reduce the risk of downtime.

Methods and materials. The study is based on an analytical literature review, operational observations, and inverter failure statistics. Classical reliability assessment methods, Weibull-based modeling, SCADA/IoT telemetry, digital twins, and machine learning algorithms were used as the methodological framework. The proposed geo-adaptive methodology integrates climatic, grid, and operational parameters into a unified risk-assessment system.

Results. The analysis shows that inverter efficiency degrades by about 0.8-1.5% per year in semi-arid climates, while the annual failure rate reaches 6-7% in hot desert regions. About 65% of failures are associated with thermal overstress of power electronic components. It is demonstrated that the geo-adaptive methodology makes it possible to build a digital risk profile for each plant, improve failure prediction accuracy, and optimize preventive maintenance.

Conclusion. The reliability of grid-connected PV systems in Uzbekistan is strongly influenced by climate, power quality, and the thermal operating conditions of power electronics. The proposed geo-adaptive methodology provides a scientific and practical basis for more accurate risk assessment, reduction of emergency shutdowns, and improvement of maintenance efficiency. Pilot implementation at real facilities is the logical next step for further validation of the approach.

Keywords: grid-connected photovoltaic power plant, industrial refrigeration complex, energy efficiency, power quality, THD, load prioritization, SCADA/ASU TP, Fergana Valley.

Введение

В последние годы надёжность и отказоустойчивость инверторов в солнечных фотоэлектрических системах стали одним из ключевых вопросов современных исследований в области солнечной энергетики. Согласно результатам международных исследований, экстремальные факторы окружающей среды - высокая температура, проникновение пыли и возмущения электросети - способны значительно увеличить вероятность отказа инверторного оборудования [1]. Как центральный элемент солнечной фотоэлектрической системы, преобразующий постоянный ток фотоэлектрических модулей в переменный, инвертор непосредственно определяет объём выработки энергии и экономическую эффективность проекта.

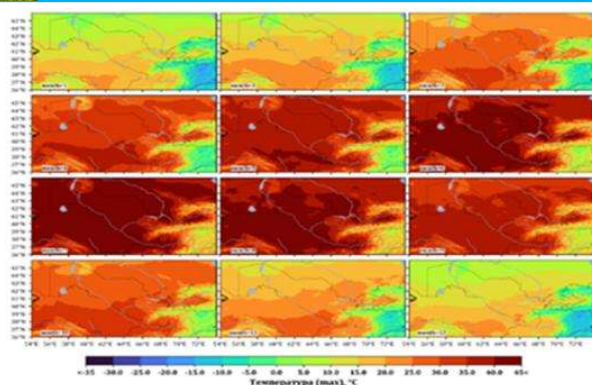


Рис. 1. Карта распределения среднесуточных максимальных температур по регионам Узбекистана за период с 2005 по 2024 годы [3].

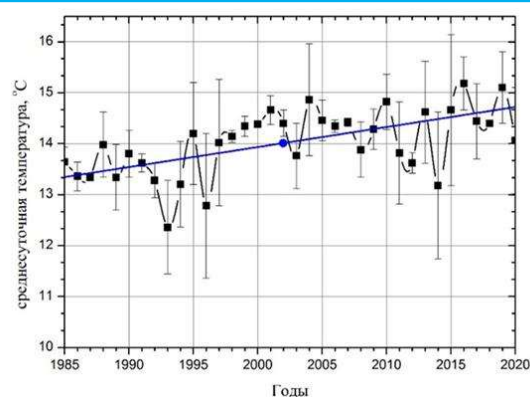


Рис.2. Динамика изменения среднесуточной температуры на территории пяти выборочных регионов страны за период 1985-2020 гг. путем анализа собранных архивных климатических данных для территории Узбекистана [3].

Узбекистан: доли установленной генерирующей мощности (оценка на конец 2025 г.)

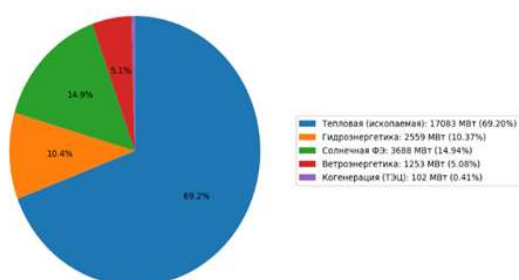


Рис. 3. Структура установленной генерирующей мощности Республики Узбекистан на конец 2025 года по источникам энергии (оценка).

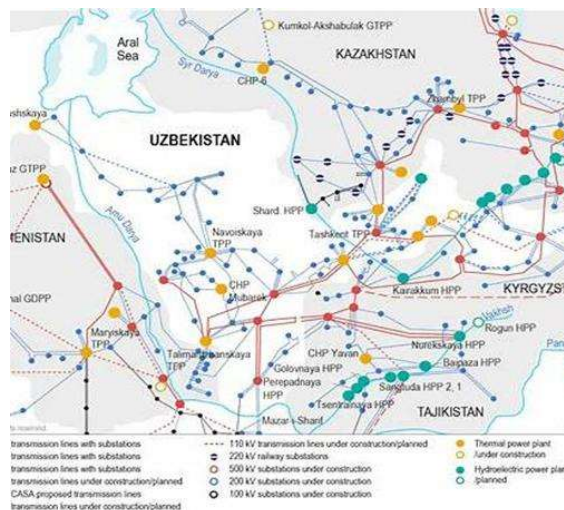


Рис. 4. Единая электроэнергетическая система Узбекистана: магистральные линии электропередачи 220–500 кВ (схематично).

В случае Узбекистана, где стремительно развивается производство солнечной энергии, вопрос надёжности инверторов приобретает особую остроту - прежде всего ввиду жаркого сухого климата и масштабных планов по развитию ВИЭ. Летом температура воздуха в южных районах страны поднимается до $+45...+48^{\circ}\text{C}$ и выше. Песчаные бури и резкие суточные колебания температуры ускоряют деградацию электроники и приводят к перегреву силовых блоков инверторов (см. рис. 1-2).

Стратегия страны предполагает, что доля электроэнергии из возобновляемых источников достигнет 25-40% от общего объёма генерации; для этого необходимо ввести в эксплуатацию 8-12 ГВт мощностей ВИЭ. Реализация этих планов напрямую зависит от надёжной работы инверторов: их отказы ведут к простою станций и потере выработки.

На рис. 3 представлена структура установленной генерирующей мощности Узбекистана по состоянию на конец 2025 года. Прогноз рассчитан как сумма данных IRENA о структуре мощности 2024 года и объёмов, введённых в эксплуатацию в 2025 году Министерством энергетики Республики Узбекистан. В энергосистеме преобладает тепловая



генерация (69,2%), тогда как доля солнечной и ветровой генерации составляет около 20,0% (14,9% и 5,1% соответственно). На гидроэнергетику приходится 10,4%, на когенерацию (ТЭЦ) - 0,4%. Следует подчеркнуть, что диаграмма отражает установленную мощность, а не фактическую выработку; системы хранения энергии (BESS), введенные в 2025 году, в структуре генерации не учтены.

В отдалённых районах электросети подвержены отклонениям напряжения и частоты, которые инвертор должен выдерживать без отключения. Нестабильность инверторов в таких условиях непосредственно снижает выработку электроэнергии. Количество и частота отключений электроэнергии в Узбекистане остаются значительными по сравнению со средним региональным показателем [3]. По данным Всемирного банка, в 2017-2018 годах предприятия в среднем теряли 24-29 рабочих дней в год из-за отключений электроэнергии: в 2016 году производственные потери крупных компаний достигали 24%, малых - 38% [4, 5].

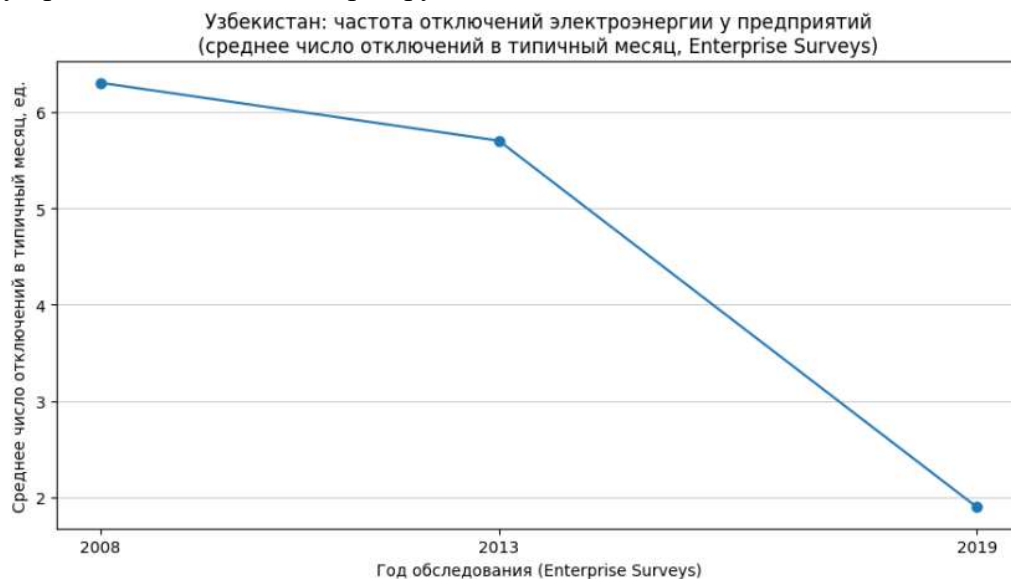


Рис. 5. Узбекистан: частота отключений электроэнергии у предприятий (среднее число отключений в типичный месяц).

Рассчитано по данным Enterprise Surveys (World Bank). В период 2008-2013 гг. среднее число отключений превышало 5,7-6,3 в месяц; к 2019 году оно сократилось почти вдвое - до 1,9 отключений в месяц.

В 2018-2021 годах в энергетическом секторе были проведены масштабные реформы: обновлено более 40 000 км линий электропередачи и 12 900 трансформаторов, введено дополнительно 4 600 МВт генерирующей мощности. По данным Министерства энергетики Узбекистана, к 2020 году число и продолжительность перебоев в электроснабжении сократились вдвое по сравнению с 2019 годом. Тем не менее проблема окончательно не решена: плановые отключения по-прежнему происходят в периоды пиковой нагрузки, а крупные аварийные отключения в 2020-2022 годах затронули Узбекистан, Кыргызстан и Казахстан вследствие сбоев в объединённой электросети. Хотя эти случаи носят эпизодический характер, они указывают на сохраняющуюся уязвимость системы. В целом тенденция положительная: частота и продолжительность незапланированных отключений на предприятиях за пять лет существенно сократились [6].

Одним из ключевых инструментов повышения надёжности энергоснабжения стало развитие солнечных фотоэлектрических электростанций (СФЭС). В стране введена в эксплуатацию первая крупная СФЭС мощностью 100 МВт («Нур Навои») - первый частный проект в солнечной энергетике Узбекистана. Станция обеспечивает электроэнергией около 31 000 домохозяйств и предотвращает выброс 150 000 тонн CO₂ ежегодно. В 2023 году в Самаркандской и Джизакской областях введены в эксплуатацию ещё две ФЭС суммарной мощностью 440 МВт; строится станция мощностью 457 МВт в Сурхандарьинской области



(Шерабад). Параллельно реализуются крупные ветроэнергетические проекты, в том числе станция мощностью 500 МВт в Каракалпакстане с перспективой расширения до 1,5 ГВт. В результате установленная мощность ВИЭ к 2023 году превысила уровень 2018 года на 49% [7], а доля возобновляемой энергии в общем энергобалансе выросла с 7,1% до 9,7%.

Влияние СФЭС на надёжность энергоснабжения уже ощутимо в летние месяцы: дневная выработка солнечной энергии помогает покрывать пики потребления в жаркую погоду, снижая нагрузку на устаревающие тепловые электростанции. В летний период 2022–2023 годов сотни дополнительных мегаватт солнечной генерации частично компенсировали дефицит мощности в дневные часы. Вместе с тем полноценная интеграция ВИЭ требует модернизации сетевой инфраструктуры: по оценкам экспертов, существующая сеть не способна безопасно принять заявленные объёмы возобновляемой генерации к 2030 году [8]. Правительство уже скорректировало целевые показатели - до 7 ГВт солнечных и 5 ГВт ветровых мощностей к 2030 году [9] - и привлекает финансирование на модернизацию сетевой инфраструктуры, в том числе кредит Всемирного банка на сумму 100 млн долларов [10].

Однако способность СФЭС повышать надёжность энергоснабжения определяется не только установленной мощностью и уровнем солнечной радиации (GHI), но и стабильностью работы силовой электроники - прежде всего инверторов. По мере роста доли ВИЭ инверторы берут на себя функции управления напряжением, реактивной мощностью, частотой, качеством электроэнергии и режимами аварийной работы. Потенциал снижения числа и длительности отключений реализуется лишь при условии комплексной модернизации сети и инверторов - с компенсацией реактивной мощности, фильтрацией гармоник, устойчивостью к перегрузкам и провалам напряжения, что особенно критично в климатических условиях Узбекистана. Долговечность и степень деградации инверторов непосредственно влияют на коэффициент использования установленной мощности и, следовательно, на эффективность работы всей СФЭС [11].

Показательны в этом отношении результаты исследования Н. Р. Авезовой и др. [12]: коэффициент доступности СФЭС мощностью 10 кВт, подключённой к электросети в Хатырчинском районе Навоийской области, составил лишь 78,8% - существенно ниже нормативного минимума ($\geq 99,5\%$). Основная причина - систематическое отключение инвертора при превышении напряжения 265 В (см. табл. 1).

Как следует из табл. 1, за 2024 год зафиксировано 613 отключений. В сентябре из 117 случаев 110 были вызваны перенапряжением, что свидетельствует о серьёзных нарушениях в местной электросети. Напряжение систематически выходит за пределы нормы EN 50549-LV (207–253 В), а в отдельных случаях достигает 265 В, вызывая срабатывание защиты инвертора.

По мнению авторов, устранение проблемы требует комплексного подхода: оптимизации нагрузок, модернизации трансформаторов и корректировки параметров сети. Эти меры способны повысить коэффициент доступности до нормативного уровня и увеличить годовую выработку на 8–12%. Мониторинг таких параметров, как напряжение (207–265 В), частота (50 Гц), THD (4,5%) и MTTR (≤ 18 ч), позволяет объективно оценить работоспособность системы и повысить точность расчётов надёжности при проектировании и сертификации ФЭС.

Таким образом, национальные стратегии и международные обязательства Узбекистана ставят перед отраслью две взаимосвязанные задачи: ускоренное развёртывание объектов ВИЭ и обеспечение их надёжной работы в условиях роста доли возобновляемой генерации и усложнения интеграции в сеть. Это требует целенаправленной работы по повышению устойчивости солнечных энергосистем к внешним воздействиям и сетевым возмущениям - прежде всего на уровне инверторных подсистем [12–14].



Таблица 1.

Статистика остановок работы СФЭС мощностью 10 кВт, установленной в Хатырчинском районе по причинам сбоев напряжения и отключений сети за 2024 год [12].

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

Далее приводится анализ научных исследований, посвящённых изучению данной проблемы.

Климатические факторы деградации инверторов. Значительный корпус исследований посвящён влиянию жаркого климата на надёжность инверторов силовой электроники. По данным Алави и др. [15], классические модели оценки деградации и отказов фотоэлектрических модулей недостаточно учитывают климатические факторы применительно к инверторам. Включение в модели деградации характеристик повышенной температуры и высокого уровня солнечной радиации повышает точность прогнозов; адаптация режимов эксплуатации к климатическим особенностям позволяет снизить число отказов инверторов примерно на 12% по сравнению с традиционными подходами. Idbouhouch и др. [16] в ходе полугодовых наблюдений в полусухих условиях Марокко зафиксировали ежегодную деградацию КПД инвертора в диапазоне 0,8–1,5%, коррелирующую с амплитудой суточных колебаний температуры. Таким образом, высокие температуры ускоряют деградацию и снижают эффективность силовой электроники.

Помимо температуры, на работу солнечных электростанций влияют и другие климатические факторы. Воšnjaković и др. [17] изучали воздействие ураганного ветра, града, высоких температур и паводков на фотоэлектрическое оборудование. Современные ФЭС демонстрируют достаточную устойчивость к этим воздействиям: при порывах ветра до 50 м/с и граде диаметром до 20 мм значительных повреждений панелей и инверторов не наблюдается. Вместе с тем число отказов силовых блоков инверторов заметно возрастает при температуре окружающей среды выше +45 °С.

Отказы компонентов и тепловые режимы. Одной из основных причин неисправности инвертора является выход из строя компонентов силовой электроники - IGBT, диодов и конденсаторов. По данным Sarita и др. [18], около 65% дефектов, зафиксированных на крупной сетевой солнечной электростанции, связаны с отказами силовых модулей. Авторы применили термоциклические испытания (многократный нагрев и охлаждение компонентов) и показали, что это позволяет выявлять развивающиеся неисправности и планировать профилактическую замену заблаговременно. Li и др. [19] разработали модель надёжности инвертора с учётом тепловых воздействий на критически важные компоненты: было установлено, что простые модели занижают оценку надёжности на 18–30%, тогда как улучшение системы охлаждения повышает её на величину до 15%. Это подтверждает, что тепловые режимы являются ключевым фактором надёжности, а



термомеханическое моделирование должно рассматриваться как обязательный элемент анализа.

Региональные различия и условия эксплуатации. Kumar и соавторы [20] сравнили статистику отказов сетевых инверторов в различных климатических зонах. Годовая частота отказов (ГЧО / AFR) составила около 4,5% в прибрежном умеренном климате, 3,2% - в холодном горном регионе и 6-7% - в зоне жаркого пустынного климата. Основная причина повышенной аварийности в пустынных условиях - перегрев при высокой температуре окружающей среды и пониженной плотности воздуха, ухудшающей теплоотвод. Эти выводы непосредственно применимы к Узбекистану: обширные пустынные и степные территории (Бухарская, Навоийская области) характеризуются именно таким климатом.

Количественные закономерности надёжности. Таким образом, современные исследования демонстрируют важность комплексного учёта климатических условий, качества электроснабжения и тепловых режимов при анализе надёжности инверторов. При этом ощущается нехватка данных долгосрочного мониторинга крупных солнечных станций в действии - особенно в странах Центральной Азии. Этот пробел может быть частично восполнен за счёт локальных исследований в Узбекистане.

На основе обзора литературы и эмпирических наблюдений можно выделить следующие количественные закономерности.

Первая закономерность: существует выраженная корреляция между ГЧО и климатической зоной. В умеренном морском климате ГЧО составляет около 3-5%, тогда как в жарких зонах она возрастает до 6-7% и выше - то есть в 1,5-2 раза. На рис. 5 сопоставлены значения ГЧО для трёх типичных климатических зон по данным Kumar и др. [20].



Рис. 6. Оценочные годовые коэффициенты отказов инверторов в разных климатических зонах (по данным Kumar и др., 2024). Жаркий пустынный климат демонстрирует в 1,5-2 раза более высокий AFR по сравнению с умеренным.

Из рис. 6 следует, что в условиях жаркого пустынного климата (характерного, в частности, для южных районов Узбекистана) ожидаемый срок службы инверторов существенно ниже, чем в умеренном климате, - если не приняты специальные меры: климат-контроль внутри шкафов инверторов, регулярная очистка от пыли, применение высокотемпературных компонентов.

Вторая закономерность: температура окружающей среды влияет не только на частоту отказов, но и на постепенную деградацию КПД инверторов в отсутствие видимых неисправностей. По данным Idbouhouch и др. [16], в полусухом климате средний КПД инвертора снижается на 0,63-3,96 процентных пункта за пять лет ($\approx 0,13-0,79\%$ в год). Ключевым механизмом является термическая усталость: суточные перепады температуры в 15-20 °C создают циклические механические напряжения в соединениях силовой электроники, постепенно ухудшая их проводимость. Кроме того, повышенные температуры увеличивают эквивалентное последовательное сопротивление (ESR) электролитических конденсаторов, что дополнительно нагружает компоненты инвертора [19].

Следовательно, даже при отсутствии явных отказов СФЭС может испытывать скрытую деградацию. Для её количественной оценки перспективным инструментом служат



температурные гистограммы: датчики на радиаторах и силовых модулях фиксируют, сколько часов в год компоненты проводят в различных температурных зонах (например, N часов при 50-60 °C). Увеличение времени в высокотемпературных зонах указывает на ускоренный износ и позволяет рассчитать сокращение ресурса относительно номинальных условий эксплуатации (25 °C).

Третья закономерность: качество электросети существенно влияет на надёжность инверторов. В распределительных сетях Узбекистана и других стран СНГ наблюдаются колебания напряжения и частоты, а также гармоники высшего порядка. Инвертор как промежуточное устройство между солнечными панелями и сетью должен выдерживать эти аномалии без потери работоспособности. При низком качестве электроэнергии возрастает число защитных отключений, а силовые компоненты подвергаются дополнительным электрическим нагрузкам и деградируют быстрее. Количественные данные по этой зависимости в литературе немногочисленны; имеющиеся косвенные оценки указывают, что в зонах с систематическими перенапряжениями ($\approx 110\%$ от номинала) число защитных отключений примерно в 1,3 раза выше. Таким образом, повышение надёжности инверторов требует не только их технического совершенствования, но и улучшения параметров распределительной сети - установки ограничителей перенапряжения, гармонических фильтров, резервных источников питания.

Обобщая изложенное, можно констатировать научный консенсус о необходимости комплексного подхода к надёжности инверторов. Жаркий климат ускоряет отказы; низкое качество электроэнергии добавляет дополнительные механизмы разрушения; большинство неисправностей сосредоточено в силовой электронике, чувствительной как к тепловым, так и к циклическим нагрузкам. Традиционные унифицированные регламенты технического обслуживания и стандартные модели надёжности не учитывают эту специфику. Необходимы адаптивные решения: локальная оптимизация систем терморегулирования и фильтрации, применение высокотемпературных компонентов в критических узлах, обслуживание по фактическому состоянию. Реализация этих подходов возможна на основе цифровых двойников, анализа больших данных и методов машинного обучения - в том числе в формате индивидуальных профилей риска для каждого инвертора в условиях Узбекистана.

Методы и материалы

Классические и современные подходы к мониторингу. Методология исследований и мониторинга инверторов. Повышение надёжности инверторов предполагает сочетание классических методологий анализа надёжности с современными цифровыми технологиями. Классические подходы основаны на сборе статистических данных и математическом моделировании времени отказа инверторов по законам распределения (экспоненциальному, Вейбулла и другим), а также на определении MTBF, расчёте коэффициентов доступности и построении диаграмм интенсивности отказов. На практике это означает реактивное техническое обслуживание и ремонт «по факту». Недостаток такого подхода - слабый учёт динамических параметров (постепенного снижения КПД, накопления термической усталости) и отсутствие предвестников отказов [21].

Актуальной тенденцией является прогнозная аналитика в мониторинге состояния инверторов, реализуемая двумя основными инструментами: цифровым моделированием и машинным обучением. Цифровые двойники - компьютерные модели инвертора или его подсистем - позволяют имитировать работу с точки зрения температурных и электрических параметров, прогнозно оценивать износ компонентов при заданных условиях эксплуатации. Например, моделирование циклов нагрева и охлаждения конденсаторов и IGBT-чипов выявляет проблемы, которые иначе остались бы незамеченными. Пренебрежение этими факторами ведёт к переоценке надёжности; анализ показывает, что в определённых условиях реальная надёжность оказывается на несколько десятков процентов ниже расчётной [22]. Цифровая модель позволяет заранее предсказать остаточный ресурс инвертора при конкретных климатических условиях и нагрузочных профилях.



Параллельно быстро развивается аналитика на основе данных, где ключевую роль играют алгоритмы машинного обучения (ML) и Интернет вещей (IoT). Встроенные датчики фиксируют температуру, влажность, вибрации, качество электроэнергии и передают данные в режиме реального времени на сервер или облачную платформу. Накопленные массивы обрабатываются алгоритмами ML (градиентный бустинг, случайный лес, нейронные сети), которые обнаруживают аномальное поведение, предшествующее отказу. Критически важным этапом является калибровка модели: байесовский алгоритм корректирует параметры модели по мере поступления новых данных, адаптируя прогноз к изменениям рабочего режима конкретной станции [23].

В табл. 2 приведено сравнение традиционного мониторинга и современных подходов.

Предлагаемая геоадаптивная методология. На практике возможно и целесообразно сочетание подходов: решения на основе цифрового двойника для оценки ресурса и алгоритмов ML, работающих с потоковыми данными IoT-датчиков [24]. Вместе с тем универсального решения, одновременно учитывающего климатическое воздействие, сетевые возмущения и внутренний износ оборудования, на сегодняшний день не существует. Именно поэтому интеграция разнородных данных и гибридных моделей рассматривается как одно из перспективных направлений исследований в области мониторинга и прогнозирования неисправностей.

В настоящей работе предлагается новый подход, основанный на идее геоадаптивного мониторинга и направленный на повышение надёжности инверторов СФЭС за счёт учёта регионального климата и характеристик электросети. Предлагаемая методология объединяет статистические алгоритмы и алгоритмы ML, работающие с региональными данными, и вводит интегральный показатель «надёжность–устойчивость», связывающий вероятностные характеристики надёжности (частота отказов, MTBF, MTTR, готовность) с параметрами сетевой среды (частота срабатывания защиты, диапазон напряжения и частоты, качество электроэнергии).

В основе вычислительного подхода лежит гибридная модель, сочетающая модель надёжности на основе распределения Вейбулла и компонент прогнозирования на основе ML. Надёжностная функция с климато-сетевой поправкой записывается в виде:

$$R(t | T, G) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta(T, G)} \right)^\beta \right] \quad (1)$$

$$\eta(T, G) = \eta_0 \exp (-\alpha(T - T_0) - \delta G) \quad (2)$$

где:

- $\eta_0 > 0$ - базовый параметр масштаба при номинальной температуре $T = T_0$ и отсутствии сетевых возмущений $G = 0$; $\beta > 0$ - параметр формы распределения Вейбулла (при $\beta > 1$ характерен режим износа); T - температурный фактор окружающей среды; G - индекс сетевых возмущений; $\alpha, \delta \geq 0$ - подбираемые параметры чувствительности.

Таблица 2.

Особенности традиционного мониторинга инверторов СФЭС и новых методов с применением машинного обучения, цифрового моделирования и IoT.

Критерий / Метод	Традиционный мониторинг (классический)	На основе машинного обучения (ML)	Имитационное моделирование (digital twin)	С применением IoT-технологий
Сбор данных	Индикация состояния инвертора на основе данных обычных датчиков (напряжение, ток, внешняя температура); плановое техническое	Обработка большого объема данных с инверторов и датчиков (температура силовых модулей, качество электроэнергии и т.	Информация о параметрах компонентов, результаты термоэлектрических расчетов; плановая проверка с использованием небольшого	Широкий спектр IoT-датчиков, размещенных рядом с каждым узлом инвертора: загрузка информации о состоянии в облаке в режиме реального времени.



	обслуживание и отчетность инженеров.	д.), сохранение для обучения модели.	количества точек данных.	
Выявление неисправностей	Реактивный: Сигнал тревоги срабатывает, когда показания параметров превышают заданные значения (аварийная остановка, перегрев), в противном случае неисправность выявляется ретроспективно.	Проактивный: Методы машинного обучения обнаруживают отклонения в тенденциях (например, снижение эффективности, колебания напряжения), рассчитывают время, необходимое для сбоя системы, на основе ранее собранной статистики.	Прогностический: Инвертор моделируется путем приложения различных нагрузок и температур; отказ системы прогнозируется, если и когда в модели наблюдается деградация компонентов.	Операционный: В процессе работы отслеживаются предельные значения, полученные от различных датчиков; как только такие параметры, как температура, вибрация, утечка тока и т. д., достигают критических значений, выдается предупреждение.
Планирование обслуживания	Техническое обслуживание по регламенту (REG) проводится через регулярные интервалы времени; ремонт после поломки неизбежен, что приводит к периоду простоя.	Прогнозирующее техническое обслуживание (PM): замена деталей или профилактические мероприятия проводятся до поломки детали, если модель указывает на вероятность неисправности.	Техническое обслуживание путем оптимизации: на основе результатов моделирования устанавливается оптимальное время для технического обслуживания и замены деталей в зависимости от климатической зоны и типа инвертора.	Проактивное техническое обслуживание: система IoT может автоматически отправлять уведомления при обнаружении любых аномалий (например, перегрева).
Преимущества	Простота внедрения, проверенные методы и недорогая установка.	Раннее выявление проблем, снижение аварий и затрат; говоря научным языком: снижение количества инцидентов и расходов; моделирование на основе реальных данных повышает точность прогнозирования.	Высокий уровень знаний о механизмах отказов, возможность проверки положительных изменений (таких как улучшенное охлаждение) в компьютерной модели; стандарты надежности должны быть стандартизированы.	Полная прозрачность фактической производительности каждого отдельного инвертора в любой момент времени; масштабируемость мониторинга; взаимодействие с системами диспетчеризации.
Ограничения	Отсутствие предупреждений о возможном снижении качества под поверхностью; влияние человеческого фактора на процесс контроля; невозможность учета всех сценариев эксплуатации.	Необходимость сбора огромного количества данных и примеров отказов для обучения; сложность интерпретации модели; необходимость мер кибербезопасности для собранных данных.	Трудоемкий процесс разработки моделей для каждой конфигурации; необходимость изменения модели при появлении нового типа детали; возможное несоответствие между прогнозом и реальностью без калибровки.	Большой объем собранных данных требует мощной инфраструктуры (сетевые и серверные системы); первоначальные инвестиции в установку датчиков высоки; совместимость различных устройств проблематична.



Физическая интерпретация: при $\alpha > 0$ рост температуры уменьшает η , то есть ускоряет истощение ресурса - что соответствует реальному поведению силовой электроники в жарком климате. При $\delta > 0$ рост индекса сетевых возмущений G также сокращает η - это отражает дополнительную нагрузку на компоненты инвертора при перенапряжениях и провалах. Таким образом, формула позволяет количественно связать климатические и сетевые условия эксплуатации с ожидаемым ресурсом оборудования. Компонент ML уточняет оценку по мере накопления данных, снижая неопределённость, обусловленную неоднородностью условий эксплуатации [25].



Рис. 7. Архитектура гео-адаптированной методики мониторинга и повышения надёжности инверторов СФЭС.

На рис. 7 показана базовая структура методологии - многоуровневый подход «данные - признаки - оценка риска - принятие решений». На первом этапе поступает поток разнородных данных (SCADA/IoT): режим нагрузки, температуры силовых блоков, метеорологические данные, состояние сети (напряжение, частота, срабатывание защитных устройств). Далее выполняются геолокация объекта, выделение климато-сетевого кластера (регион, тип сети, характерные отклонения), нормализация и предобработка данных, формирование признаков, отражающих тепловые и электрические нагрузки (индикаторы термоциклирования, время пребывания при критических температурах, индексы событий перенапряжения и пониженного напряжения). Гибридная модель формирует функцию вероятности отказа и оценку риска на заданном временном горизонте. Ключевое свойство подхода - адаптивность: прогнозы надёжности непрерывно уточняются по мере поступления новых данных.

Алгоритмическое ядро геоадаптивного мониторинга (см. рис. 8) представляет собой цикл предиктивного управления состоянием инвертора [26]:

1. сбор телеметрии и событий отказов и срабатываний защит;
2. выделение климато-сетевого контекста (регион, сезон, тип сети);
3. извлечение признаков деградации и стресса (термопрофили, электрические отклонения, тренды КПД);
4. расчёт интегрального критерия надёжности и устойчивости, прогноз вероятности отказа;
5. регулярное байесовское обновление параметров модели при поступлении новых данных - снижение неопределённости и адаптация прогноза к конкретной станции;



6. формирование управляющих воздействий: предупреждения, приоритизация осмотров, рекомендации по профилактической замене, очистке или изменению режима работы, оценка ожидаемых потерь выработки при отклонении параметров.

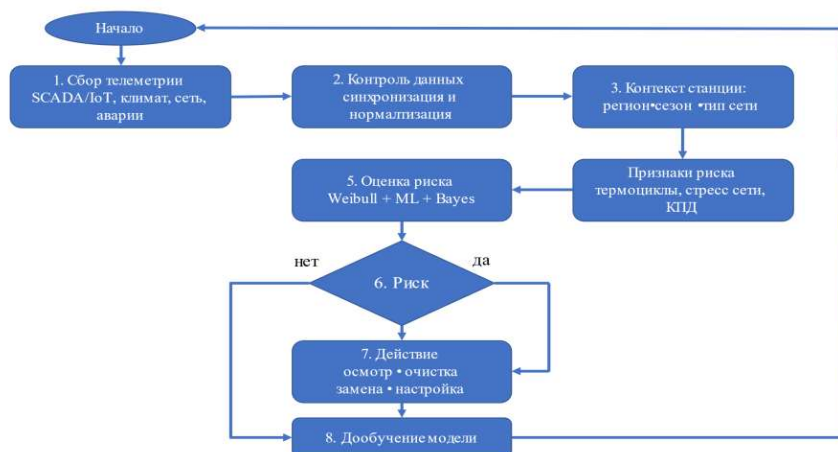


Рис. 8. Алгоритм функционирования гео-адаптированной системы предиктивного мониторинга инверторов СФЭС.

Практическое применение методологии предполагает визуализацию результатов в виде карт надёжности в формате ГИС, где каждый инвертор имеет цифровой профиль риска. Такой профиль позволяет выявлять зоны повышенной аварийности, проводить сравнительный анализ однотипных объектов и целенаправленно планировать мероприятия по техническому обслуживанию и ремонту. Дополнительно предусмотрен расчёт экономико-математических моделей обслуживания с оценкой влияния различной периодичности профилактики на риск крупного отказа, продолжительность простоев и общие затраты. Таким образом, методология обеспечивает переход от технической диагностики к оптимизации эксплуатационных решений.

Предложенная геоадаптивная методика формирует интегрированный контур повышения надёжности инверторов, в котором климатические воздействия, сетевые возмущения, тепловые режимы и эксплуатационная экономика рассматриваются совместно, а оценка риска отказов становится локально-специфичной для каждой площадки.

Выводы

На основе проведённого анализа и обобщения эксплуатационных данных установлено, что надёжность подключённых к сети солнечных фотоэлектрических энергосистем (СФЭС) в Узбекистане представляет собой интегральный параметр, формирующийся под совместным воздействием климатических условий, качества электроснабжения, тепловых режимов работы силовой электроники и выбранной стратегии технического обслуживания.

1. Показано, что в регионах с жарким и пыльным климатом вероятность отказов значительно возрастает вследствие ускоренной деградации КПД, повышенной частоты аварийных остановок и преобладающего механизма отказов - тепловой перегрузки силовых блоков.

2. Установлено, что традиционный подход к техническому обслуживанию непригоден для разнородных климатических и сетевых условий: он не учитывает постепенный процесс деградации, динамику тепловых нагрузок и изменчивость сетевых аномалий.

3. Обоснована научная состоятельность разработанной методологии геоадаптивного мониторинга и повышения надёжности инверторов СФЭС, в которой статистика отказов, локальные эксплуатационные данные, модели Вейбулла и методы машинного обучения объединены в едином цикле оценки и управления рисками.



4. Отличительной особенностью предложенного подхода является интегральная метрика «надёжность–устойчивость», позволяющая совместно оценивать MTBF, MTTR, коэффициент готовности, частоту остановок, отклонения напряжения и частоты и другие эксплуатационные показатели станции.

5. Практическая значимость методологии состоит в формировании цифрового профиля риска для каждой станции, визуализации результатов в формате ГИС и переходе к прогнозирующему техническому обслуживанию, направленному на сокращение простоев, потерь выработки и затрат на ТОиР.

Представленная методология служит научной основой для управления надёжностью СФЭС в условиях Узбекистана и других стран с экстремальными климатическими условиями эксплуатации. Необходимым следующим шагом является пилотная апробация предложенного подхода на реальных объектах.

Список литературы

- [1]. International Energy Agency (IEA). Solar Energy Policy in Uzbekistan: A Roadmap. - Paris: IEA, 2022. - 124 p.
- [2]. European Bank for Reconstruction and Development (EBRD). EBRD approves new country strategy for Uzbekistan // Press Release. - 2024.- January 26.
- [3]. IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2023. - Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2024. - 186 p.
- [4]. World Bank. Growth and Job Creation in Uzbekistan: An In-Depth Diagnostic. - Washington DC: World Bank, 2018. - 214 p.
- [5]. World Bank. Uzbekistan to Invest in Modernizing Electricity Distribution Networks with World Bank Support // Press Release. - 2025. - May 15.
- [6]. Ministry of Energy of the Republic of Uzbekistan. On Causes of Power Outages. - Tashkent, 2020.
- [7]. IRENA. Uzbekistan: Renewables Readiness Assessment. - Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2024. - 98 p.
- [8]. Jalolova S. World Bank approves \$100 million to modernize Uzbekistan's power grid // The Times of Central Asia. - 2025. - May 19.
- [9]. Masdar celebrates inauguration of landmark 100 MW Nur Navoi Solar Project in Uzbekistan // PR Newswire. - 2021. - August 28.
- [10]. Government of Uzbekistan. Updated Nationally Determined Contribution of the Republic of Uzbekistan. - Tashkent, 2021.
- [11]. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Photovoltaic Inverter Reliability Assessment. - Golden (CO): NREL, 2019. - Report NREL/TP-5D00-74462.
- [12]. Аvezova Н.Р., Шогучкаров С.К., Кудратов А.Р. Критерии устойчивости и надежности сетевых фотоэлектрических систем: методология оценки и практическое применение // Проблемы информатики и энергетике. - 2024. - №4. - С. 56-70.
- [13]. International Energy Agency (IEA). Uzbekistan 2022: Energy Policy Review. - Paris: OECD/IEA, 2022.
- [14]. Strategy for the Transition of the Republic of Uzbekistan to a Green Economy for 2019–2030. Resolution of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan No. 841. - Tashkent, 2019.
- [15]. Alavi O., Kaaya I., De Ceuninck W., Van Mierlo J. Assessing the impact of PV panel climate-based degradation rates on inverter reliability in grid-connected solar energy systems // Heliyon. -2024. - Vol. 10. - No. 3. - e25839.
- [16]. Idbouhouch O., Taqi S., Ajerrar A. et al. Assessing PV inverter efficiency degradation under semi-arid climate scenarios // Heliyon. -2024. - Vol. 10. - No. 23. - e40308.
- [17]. Bošnjaković M., Stojkov M., Katinić M., Lacković I. Effects of extreme weather conditions on PV systems // Sustainability. - 2023. -Vol. 15. - No. 22. - Art. 16044.
- [18]. Sarita K., Saket R.K., Khan B. Reliability, availability, and condition monitoring of inverters of grid-connected solar photovoltaic systems // IET Renewable Power Generation. - 2023. - Vol. 17. - No. 2. - P. 202-213.



- [19]. Li T., Wang P., Sun Y., Li Y. Reliability evaluation of photovoltaic system considering thermal characteristics of components // Electronics. - 2021. - Vol. 10. - No. 21. - Art. 2661.
- [20]. Kumar A.S., Arul S., Sudhakar B., Kottursamy M. Reliability analysis of PV inverters considering locational impact // E3S Web of Conferences. -2024. -Vol. 540. - Art. 10011.
- [21]. Singh S., Saket R.K., Khan B. A comprehensive review of reliability assessment methodologies for grid-connected photovoltaic systems // IET Renewable Power Generation. - 2023. - Vol. 17. - No. 7. - P. 1859-1880.
- [22]. Kull K., Asad B., Khan M.A., Naseer M.U., Kallaste A., Vaimann T. Faults, failures, reliability, and predictive maintenance of grid-connected solar systems: A comprehensive review // Applied Sciences. - 2023. -Vol. 15. - No. 21. - Art. 11461.
- [23]. Francisti J., Fodor K., Balogh Z., Magdin M. Predictive modeling and anomaly detection in solar PV inverters using machine learning // Results in Engineering. - 2025. - Vol. 28. - Art. 108348.
- [24]. Ramos E., Vale Z. Integrating machine learning and digital twins for smart grid asset management: A review of hybrid predictive maintenance approaches // Energies. -2023. - Vol. 16. - No. 15. -Art. 5712.
- [25]. Kumar R., Mishra S.K., Sahoo A.K. et al. Data-driven prediction-based reliability assessment of solar energy systems incorporating uncertainties for generation planning // Scientific Reports. -2025. - Vol. 15. - Art. 9335.
- [26]. Vita V., Fotis G., Chobanov V., Pavlatos C., Mladenov V. Predictive maintenance for distribution system operators in increasing transformers' reliability // Electronics. - 2023. -Vol. 12. - No. 6. - Art. 1356.