



## ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА НАДЕЖНОСТЬ ИНВЕРТОРОВ В КРУПНОМАСШТАБНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Рахмонов И.У.<sup>1</sup>, Ниёзов<sup>1</sup> Н.Н., Курбонов<sup>1</sup> Н.Н., Ахметова<sup>2</sup> Р.В., Таслимов<sup>1</sup> А.Д.,  
Расулов<sup>1</sup> А.Н.

<sup>1</sup>Ташкентский государственный технический университет, г. Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2076-5919>, [ilider1987@yandex.ru](mailto:ilider1987@yandex.ru)

**Резюме:** ЦЕЛЬ. Проведение динамического анализа факторов, влияющих на надёжность инверторов, применяемых в крупномасштабных солнечных электростанциях, и разработка алгоритмов предиктивного мониторинга их технического состояния. МЕТОДЫ. В рамках исследования использованы методы системной классификации факторов надёжности, теплового, электрического и механического анализа, а также методы машинного обучения на базе автокодировщиков для обнаружения аномалий. Применены сенсорные технологии и IoT-архитектура для сбора и обработки параметров в реальном времени. РЕЗУЛЬТАТЫ. Разработана классификация факторов, влияющих на отказоустойчивость инверторов, с указанием возможностей их сенсорного мониторинга. Построена архитектура адаптивной системы анализа технического состояния, включающая блок-схему динамического мониторинга. Предложена модель Autoencoder + Threshold-based Anomaly Detection для оценки индекса состояния инверторов в реальном времени, что обеспечивает раннее выявление потенциальных неисправностей. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработанный подход позволяет повысить надёжность и эксплуатационную эффективность централизованных инверторов за счёт внедрения интеллектуальной системы мониторинга. Применение предиктивной аналитики и сенсорной архитектуры способствует снижению затрат на техническое обслуживание, повышению устойчивости работы солнечных электростанций и предупреждению отказов до их возникновения.

**Ключевые слова:** надёжность; инверторы; солнечные электростанции; сенсоры; динамический анализ; автокодировщик; предиктивный мониторинг; IoT.

**Для цитирования:** Рахмонов И.У., Ниёзов Н.Н., Курбонов Н.Н., Ахметова Р.В., Таслимов А.Д., Расулов А.Н. Динамический анализ факторов, влияющих на надёжность инверторов в крупномасштабных солнечных электростанциях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 110-122. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-110-122.

## DYNAMIC ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE RELIABILITY OF INVERTERS IN LARGE-SCALE SOLAR POWER PLANTS

Rakhmonov<sup>1</sup> I.U., Niyozov<sup>1</sup> N.N., Kurbnov<sup>1</sup> N.N., Akhmetova<sup>2</sup> R.V., Taslimov<sup>1</sup> A.D.,  
Rasulov<sup>1</sup> A.N.

<sup>1</sup>Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2076-5919>, [ilider1987@yandex.ru](mailto:ilider1987@yandex.ru)

**Abstract.** OBJECTIVE. To conduct a dynamic analysis of the factors affecting the reliability of inverters used in large-scale solar power plants and to develop predictive monitoring algorithms for their technical condition. METHODS. The study employed methods of systematic classification of reliability factors, thermal, electrical, and mechanical analysis, as well as machine learning techniques based on autoencoders for anomaly detection. Sensor technologies and IoT architecture were utilized for real-time data acquisition and processing. RESULTS. A

classification of factors influencing inverter reliability was developed, including an assessment of their sensor monitoring capabilities. An adaptive system architecture for technical condition analysis was constructed, incorporating a block diagram of dynamic monitoring. An Autoencoder + Threshold-based Anomaly Detection model was proposed to evaluate the inverter health index in real time, enabling early detection of potential failures. CONCLUSION. The proposed approach enhances the reliability and operational efficiency of centralized inverters by implementing an intelligent monitoring system. The use of predictive analytics and sensor-based architecture contributes to reduced maintenance costs, improved operational stability of solar power plants, and preemptive failure detection.

**Keywords:** reliability; inverters; solar power plants; sensors; dynamic analysis; autoencoder; predictive monitoring; IoT.

**For citation:** Rakhmonov I.U., Niyozov N.N., Kurbnov N.N., Akhmetova R.V., Taslimov A.D., Rasulov A.N. Dynamic analysis of factors affecting the reliability of inverters in large-scale solar power plants. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (3):110-122. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-110-122.

### Введение (Introduction)

Рост спроса на потребление энергии приводит к необходимости более широкого использования возобновляемых источников энергии. В частности, Республика Узбекистан планирует к 2030 году увеличить установленную мощность возобновляемых источников энергии до 27 ГВт, что позволит повысить долю "зеленой" энергии в общем объеме производства электроэнергии не менее чем до 40%, а также сократить выбросы вредных веществ в атмосферу на 34 миллиона тонн. При этом только за счет солнечных электростанций предполагается достичь мощности 8,6 ГВт [1]. К 2035 году в Республике Узбекистан планируется достичь общей установленной мощности на уровне 57,1 ГВт, из которых 42,9 ГВт, или более 75%, будут приходиться на возобновляемые источники энергии, включая 21,1 ГВт ветровых, 18,5 ГВт солнечных электростанций и 3,3 ГВт накопительных (аккумуляторных) систем (Рис. 1).

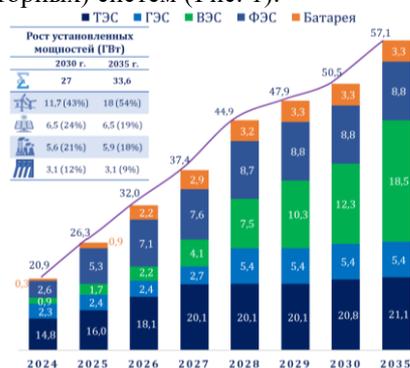


Рис. 1. Рост установленных мощностей в Узбекистане (ГВт) Fig. 1. Growth of Installed Capacities in Uzbekistan (GW)

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Широкомасштабное развитие солнечных электростанций предъявляет повышенные требования к стабильности, надежности и эффективности энергетических систем. Особенно это актуально для централизованных инверторов, которые являются ключевыми технологическими компонентами крупных солнечных электростанций. Они выполняют преобразование постоянного тока (DC), вырабатываемого солнечными панелями, в переменный ток (AC) для подачи в электрическую сеть. Однако долговечность и надежность работы инверторов оказывают прямое влияние на общую эффективность солнечной электростанции.

В настоящее время одним из актуальных технических вызовов является сокращение срока службы инверторов и рост частоты их отказов. Согласно статистическим данным, более 60% неисправностей в солнечных электростанциях связано именно с инверторами. Это, в свою очередь, ведет к увеличению эксплуатационных затрат, перебоям в выработке электроэнергии и снижению общего КПД станции [2,3]. В связи с этим системный и динамический анализ факторов, влияющих на надежность инверторов, а также всестороннее изучение механических,

термических и электрических нагрузок, возникающих в процессе их эксплуатации, представляют собой важную научно-техническую задачу.

Настоящая статья посвящена динамическому анализу ключевых факторов, влияющих на надежность инверторов, используемых в крупных солнечных электростанциях (влияние климатических условий, изменчивость нагрузки, температурный режим, старение компонентов и др.). Кроме того, рассматриваются типы возможных отказов инверторных модулей, методы их мониторинга, диагностики и стратегии технического обслуживания. Результаты исследования направлены на разработку научно обоснованных рекомендаций по повышению надежности инверторов и оптимизации эксплуатации солнечных электростанций.

#### *Целью исследования*

Основной целью настоящего исследования является выявление факторов, влияющих на надежность инверторов, используемых в крупномасштабных солнечных электростанциях, проведение системного анализа динамических нагрузок, внешних воздействий и технического старения, а также разработка научно обоснованных предложений по повышению эффективности их долгосрочной эксплуатации.

В рамках исследования предполагается решить следующие задачи: анализ существующих научных источников, посвящённых техническим характеристикам инверторов и причинам их отказов; классификация факторов, влияющих на надежность; моделирование функционального поведения инверторов под воздействием динамических нагрузок; разработка оптимизированных подходов к техническому обслуживанию и мониторингу.

#### *Научная значимость*

Исследование направлено на углубление научно-теоретических основ повышения надежности инверторов в области солнечной энергетики. Особое внимание уделяется динамическому анализу поведения компонентов инверторов в процессе их эксплуатации. В результате работы разрабатывается системная модель факторов, влияющих на надежность, формируются методы оценки надежности и соответствующие индексы, а также предлагаются научные подходы к ранней диагностике неисправностей и мониторингу состояния инверторов. Полученные результаты вносят вклад в развитие научных исследований, направленных на обеспечение технико-экономической устойчивости систем возобновляемой энергетики.

#### *Практическая значимость*

Результаты исследования способствуют снижению эксплуатационных проблем, связанных с инверторами на солнечных электростанциях, повышению эффективности их работы и обеспечению надежного функционирования в течение всего срока службы. На практике полученные выводы могут быть использованы: при проектировании солнечных электростанций — для оптимизации размещения инверторов и их систем охлаждения; при разработке систем динамического мониторинга и диагностики инверторов; при планировании стратегий технического обслуживания на основе цифровых моделей; а также при разработке стандартов надежности инверторов для локальных производителей. Результаты исследования могут служить практическим руководством для промышленных предприятий, энергетических компаний и организаций, осуществляющих техническое обслуживание объектов солнечной генерации.

#### *Литературный обзор (Literature Review)*

В публикациях [2–4] рассматриваются различные конструктивные решения инверторов для фотоэлектрических систем и оценивается их влияние на надежность при эксплуатации в составе солнечных электростанций. В статье [2] Kaplani и Roinila разработали модель деградации и снижения эффективности инверторов при длительной работе в условиях сетевого подключения, с учетом внешних факторов, таких как температура и электрическая нагрузка. В работе [3] Xiao и соавт. провели топологический анализ интерфейсов для слежения за точкой максимальной мощности в солнечных установках, уделяя внимание отказоустойчивости различных схем преобразования энергии. Аналогично, в исследовании [4] Sahan и коллеги сравнили основные топологии силовых преобразователей в фотоэлектрических системах, выделяя их конструктивные преимущества и слабые места с точки зрения отказов.

В работах [5–7] подробно исследуются факторы, влияющие на динамическую надежность инверторов, включая поведение систем при сетевых возмущениях и климатических колебаниях. Так, Papadopoulos и Hatzigiorgiou в статье [5] провели моделирование работы инверторов при динамических условиях нагрузки, показав влияние сетевых флуктуаций на отказоустойчивость оборудования. В статье [6] Rodriguez

и соавт. представили методы синхронизации преобразователей с сетью на базе обобщенных интеграторов второго порядка, что позволило лучше понять характер взаимодействия инверторов с сетью при переходных процессах. Особое внимание вопросам комплексной оценки надежности инверторов уделено в работе [7] de Oliveira и коллег. Авторы смоделировали поведение инверторов под действием климатических и электрических стрессов, определив основные параметры, приводящие к отказам в условиях эксплуатации.

На основе анализа приведенных исследований можно заключить, что надежность инверторов в крупномасштабных фотоэлектрических установках зависит от целого комплекса факторов — начиная от выбора схемотехники и заканчивая устойчивостью к внешним возмущениям. Проведение динамического моделирования и прогнозирования отказов представляет собой ключевую задачу в целях повышения эффективности и надежности солнечных электростанций в долгосрочной перспективе.

#### **Материалы и методы (Materials and methods)**

Изменение нагрузки связано с параметрами тока, напряжения и активной мощности, проходящих через инвертор [4,5]. Номинальные значения тока и напряжения должны находиться в пределах  $\pm 10\%$ . Мощность оценивается в зависимости от нагрузки инвертора. Среднее значение тока вычисляется по формуле:

$$I_{\text{avg}} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt, \text{ а активная мощность — как } P = I \cdot U \cdot \cos \varphi$$

Оценка мощности инвертора производится на основе отношения его номинальной мощности ( $P_0$ ) к реально потребляемой мощности ( $P_{\text{реал}}$ ). Этот показатель называется коэффициентом загрузки ( $\eta_H$ ):

$$\eta_H = \frac{P_{\text{реал}}}{P_0} \times 100\%$$

Реальная мощность рассчитывается по формуле:  $P_{\text{реал}} = V \cdot I \cdot \cos \varphi$ . Для эффективной и надёжной работы инверторы обычно функционируют при загрузке от 30% до 90%; превышение 100% увеличивает риск отказов. В реальных условиях внешние факторы, такие как температура и высота над уровнем моря, влияют на мощностные характеристики инвертора. Производители указывают два основных корректирующих коэффициента:  $k_T$  — температурный, и  $k_H$  — высотный. При температуре выше  $40^\circ\text{C}$  возможно перегревание ключевых компонентов, в частности IGBT-транзисторов. Например, при  $50^\circ\text{C}$   $k_T \approx 0,90$ , то есть мощность должна быть снижена до 90%.

Для расчёта используется формула:  $k_T = 1 - \alpha_T \cdot (T - 40)$ , где  $\alpha_T \approx 0.01$  — коэффициент снижения.

На больших высотах из-за пониженной плотности воздуха снижается эффективность охлаждения. При 1000 м  $k_H = 1$ , а при 2000 м —  $k_H \approx 0,90$ . Расчётное выражение:  $k_H = 1 - \alpha_H \cdot (h - 1000)$ , где  $\alpha_H \approx 0.0001$  указывает на снижение на 1% на каждые 500 м. Соответственно, итоговая рабочая мощность определяется как:

$$P_{\text{eff}} = P_0 \cdot k_T \cdot k_H$$

Стабильность сетевого напряжения является критическим фактором в работе инвертора. Согласно стандартам IEC и GOST, допустимое отклонение не должно превышать  $\pm 10\%$  от номинала. Формула расчёта колебаний напряжения:

$$\Delta U = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{ном}}} \times 100\%$$

THD (Total Harmonic Distortion) — это величина, отражающая уровень гармонических искажений в токе или напряжении относительно основной гармоники. В соответствии со стандартами IEC 61000-2-4 и IEEE 519, допустимый уровень THD для напряжения — до 5%, для тока — до 8–10%. Расчётная формула:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \times 100\%$$

Отключение от сети происходит при резком исчезновении питающего напряжения. Согласно ГОСТ 32144:2013, число таких отказов не должно превышать 10 случаев в год. В условиях промышленной эксплуатации это значение регистрируется в системах мониторинга в режиме реального времени.

Тепловые параметры играют ключевую роль в обеспечении надёжности работы инверторов [6,7]. Накопление тепла внутри устройства связано с ростом внутренней температуры, при этом нормальный диапазон составляет от  $-20^\circ\text{C}$  до  $+60^\circ\text{C}$ , а оптимальный режим работы — в пределах  $25\text{--}45^\circ\text{C}$ . Температурное превышение оценивается по выражению:

$$\Delta T = T_{\text{внутр}} - T_{\text{внеш}}$$

где,  $T_{\text{внутр}}$  — температура компонентов,  $T_{\text{внеш}}$  — температура окружающей среды. При неисправности системы охлаждения наблюдается значительное превышение температурного градиента, и если  $\Delta T > 20^\circ\text{C}$ , это свидетельствует о снижении эффективности вентиляции или радиаторов. Для оценки термической стабильности также используется производная по времени:  $\frac{dT(t)}{dt} \leq 5^\circ\text{C}/\text{с}$ , где превышение данного порога указывает на опасное тепловое воздействие. Наконец, многократные температурные циклы могут вызывать термическую усталость пайки и других материалов. Число критических циклов можно приближённо рассчитать по формуле:

$$N_{\text{цикл}} = \frac{T_{\text{макс}} - T_{\text{мин}}}{\Delta T_{\text{крит}}}$$

где  $\Delta T_{\text{крит}}$  — допустимый перепад температуры для безотказной работы. Таким образом, тепловой анализ на основе мониторинга температуры и её динамики необходим для предотвращения деградации компонентов инвертора.

Среди механических факторов, влияющих на надёжность инверторов, основными являются вибрации, коррозия, а также воздействие ультрафиолетового излучения и механические повреждения [8,9]. Вибрационные нагрузки, как правило, не должны превышать 0,5g (около 4,9 м/с<sup>2</sup>), и рассчитываются по формуле:

$$a = A \cdot \omega$$

где — амплитуда,  $\omega = 2\pi f$  — угловая частота. Допустимый уровень вибраций зависит от условий эксплуатации и устойчивости корпуса оборудования. Касательно коррозионной активности и УФ-воздействия, они не контролируются автоматически, а оцениваются персоналом в рамках регламентных проверок — например, еженедельно в течение месяца. Данные оценки фиксируются в журнале или цифровой системе регистрации, а затем анализируются для определения динамики деградации. Уровень коррозии классифицируется согласно стандартам ISO 9223 (категории C1–C5), в то время как устойчивость к ультрафиолету зависит от степени защиты корпуса (например, IP65 и выше) [10,11]. Наличие механических повреждений также выявляется при визуальном осмотре и учитывается в комплексной диагностике оборудования.

Эксплуатационные факторы, такие как качество технического обслуживания, программные сбои, отсутствие системы мониторинга, неправильная установка и низкое качество компонентов, являются одними из ключевых причин снижения надёжности инверторов. Качество технического обслуживания может быть количественно оценено через показатель выполнения регламентных процедур:

$$K_{\text{ТО}} = \frac{N_{\text{вып}}}{N_{\text{план}}} \times 100 \%$$

где  $N_{\text{вып}}$  — количество выполненных обслуживаний,  $N_{\text{план}}$  — планируемое число процедур. Программные ошибки выявляются посредством анализа логов, а их частота рассчитывается как:

$$\lambda_{\text{ПО}} = \frac{N_{\text{ош}}}{T_{\text{мон}}}$$

где  $N_{\text{ош}}$  — количество зафиксированных ошибок,  $T_{\text{мон}}$  — период мониторинга. Поддержание минимального уровня логируемых ошибок и регулярное обновление прошивки являются важнейшими условиями надёжной работы встроенного ПО.

Отсутствие системы мониторинга можно частично компенсировать ручным контролем, однако для современной эксплуатации необходимо внедрение телеметрии на базе протоколов Modbus, MQTT или SCADA. Уровень охвата мониторинга может быть представлен индексом [12,13]:

$$K_{\text{мон}} = \frac{n_{\text{мон}}}{n_{\text{общ}}} \times 100 \%$$

где  $n_{\text{мон}}$  — количество параметров, находящихся под контролем,  $n_{\text{общ}}$  — общее количество критичных параметров. Неправильная установка и некачественные компоненты определяются в процессе визуального осмотра, а также на основе сопроводительной документации (сертификаты IEC, ISO, UL). Хотя прямых формул для оценки этих факторов нет, их воздействие на надёжность может быть выявлено через статистику отказов и анализ деградации компонентов в долгосрочной перспективе [15,16,17].

Функция надёжности  $R(t)$  отражает вероятность безотказной работы инвертора в течение определённого времени и рассчитывается по следующей экспоненциальной модели (Рис. 2):

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

где  $\lambda$  — интенсивность отказов (в 1/час или 1/сутки), определяется выражением:

$$\lambda = \frac{N_{\text{отказов}}}{T_{\text{общий}}}$$

где здесь  $N_{\text{отказов}}$  — количество зафиксированных отказов, а  $T_{\text{общий}}$  — общее время работы инвертора (в часах или днях). Согласно отраслевым стандартам, значение функции  $R(t)$  должно быть не менее 80% (то есть  $R(t) \geq 0,8$ ), что считается порогом надёжной эксплуатации. Данный показатель зависит от эксплуатационной среды, уровня технического обслуживания и качества компонентов. Чем выше показатель MTBF, тем меньше значение  $\lambda$ , и тем выше надёжность  $R(t)$ . Таким образом, идеальное значение  $R(t)$  должно стремиться к 1.

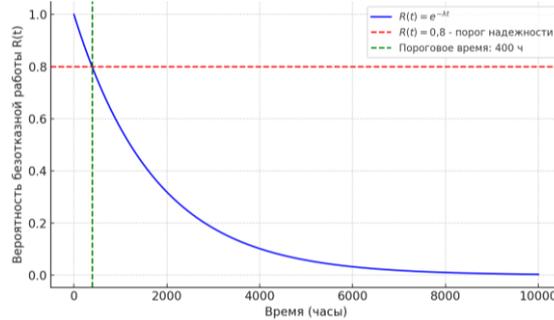


Рис. 2. График с учётом остаточного срока службы (RUL) Fig. 2. Graph Considering RUL

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

С целью оценки возможности динамического анализа в реальном времени факторов, влияющих на надёжность централизованных инверторов, на основе проведённых исследований была разработана классификация этих факторов по пяти основным группам. В таблице 1 представлено их систематизированное распределение в соответствии с типом воздействия и потенциальной возможностью мониторинга с применением сенсорных технологий.

Таблица 1  
Table 1

Факторы, влияющие на надёжность инверторов в крупномасштабных солнечных электростанциях и возможности их мониторинга с использованием сенсоров  
Factors Affecting the Reliability of Inverters in Large-Scale Solar Power Plants and Their Monitoring Possibilities Using Sensors

Группа факторов	Название фактора	Отслеживается сенсором	Научное обозначение	Единица измерения
1. Электрические факторы	Изменение нагрузки	Да	I, V, P	A, V, W
	Флуктуации сетевого напряжения	Да	U	V
	Гармонические искажения	Да	THD	%
	Отключение сети	Да	K	шт.
2. Тепловые факторы	Накопление тепла	Да	T	°C
	Неисправность системы охлаждения	Да	T, ΔT	°C
	Температурные циклы	Да	T(t)	°C
3. Механические факторы	Вибрация	Да	a	g (m/s <sup>2</sup> )
	Коррозия	Нет	—	—
	УФ-излучение и механические повреждения	Нет	—	—

Окончание таблицы 1

4. Атмосферные факторы	Высокая температура	Да	T	°C
	Низкая температура	Да	T	°C
	Влажность и осадки	Да	RH	%
	Пыль и песчаные бури	Частично	PM	µg/m <sup>3</sup>
	Высота (пониженное давление)	Частично	h, p	m, Pa
5. Эксплуатационные факторы	Качество технического обслуживания	Нет	—	—
	Программные ошибки	Частично (через журналы регистрации / логи)	—	—
	Неправильная установка	Нет	—	—
	Отсутствие системы мониторинга	Частично	—	—
	Низкое качество компонентов	Косвенно	—	—

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Большинство рассмотренных сенсоров на сегодняшний день уже встроены в конструкцию современных инверторов, и соответствующие измеряемые параметры, как показано в таблице 1, выделены зелёным фоном. Эти данные автоматически фиксируются встроенными средствами самодиагностики и могут быть интегрированы в централизованную систему мониторинга в реальном времени с использованием стандартных протоколов передачи данных (например, Modbus RTU/TCP, CAN, RS-485). Полученная информация подлежит последующему анализу с применением методов цифровой диагностики и предиктивной аналитики для оценки технического состояния оборудования. Параметры, отмеченные синим фоном, не входят в базовую комплектацию инвертора и требуют установки дополнительных внешних сенсоров. Решение об их внедрении принимается на основе оценки условий эксплуатации, специфики объекта и степени влияния данных факторов на надёжность оборудования. Для этого применяются современные методы анализа, такие как корреляционный анализ, оценка важности признаков (SHAP values), анализ мод и последствий отказов (FMEA) и др. Таким образом, данные параметры включаются в систему мониторинга в зависимости от индивидуальных потребностей и приоритетов надёжности. Показатели без фоновой заливки отражают те параметры, которые не могут быть измерены автоматически и требуют ручного ввода.



Рис. 3. Блок-схема динамического анализа факторов, влияющих на надёжность инверторов в крупномасштабных солнечных электростанциях

Fig. 3. Block Diagram of Dynamic Analysis of Factors Affecting the Reliability of Inverters in Large-Scale Solar Power Plants

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Они фиксируются техническим персоналом по результатам регламентных проверок, профилактических осмотров или визуальной диагностики. К таким данным, как правило, относятся качественные характеристики, не подлежащие сенсорному контролю (например, уровень коррозии, механические повреждения, качество монтажных соединений и др.), и вносятся в информационную систему через эксплуатационные

журналы или цифровые платформы технического обслуживания. Процесс обмена данными между компонентами реализуется в соответствии с архитектурой, представленной на блок-схеме в рис. 3.

На основе представленной таблицы можно сделать вывод, что ряд ключевых параметров, оказывающих влияние на надёжность инверторов — в том числе гармонические искажения, вибрации, температура окружающей среды, влажность, пылевая нагрузка и высота установки (атмосферное давление) — требуют установки дополнительных внешних сенсоров для эффективного мониторинга в реальном времени. Так, для оценки гармонических искажений рекомендуются сенсоры типа PZEM-004T или ADE7758, для контроля вибраций — MPU6050 или ADXL345, а для измерения температуры и влажности — комбинированные модули BME280 или SHT31. Пылевые условия могут отслеживаться при помощи SDS011 или GP2Y1010AU0F, а параметры высоты и атмосферного давления — посредством BMP280 или MS5611.

Кроме того, отдельные эксплуатационные факторы, такие как неправильная установка оборудования или отсутствие систем мониторинга, не поддаются автоматическому сенсорному контролю и требуют ручной оценки техническим персоналом или интеграции с внешними логгерами и IoT-модулями, например, на базе ESP32 с поддержкой MQTT. Такой подход позволяет реализовать модульную, адаптивную архитектуру системы мониторинга, основанную на приоритетности факторов риска, что способствует повышению надёжности, эффективности обслуживания и снижению эксплуатационных потерь в инфраструктуре крупных фотоэлектрических станций.

Собранные выше данные в режиме реального времени непрерывно анализируются по алгоритму, представленному на рисунке 4, с учётом установленных пороговых значений и нормативных критериев.

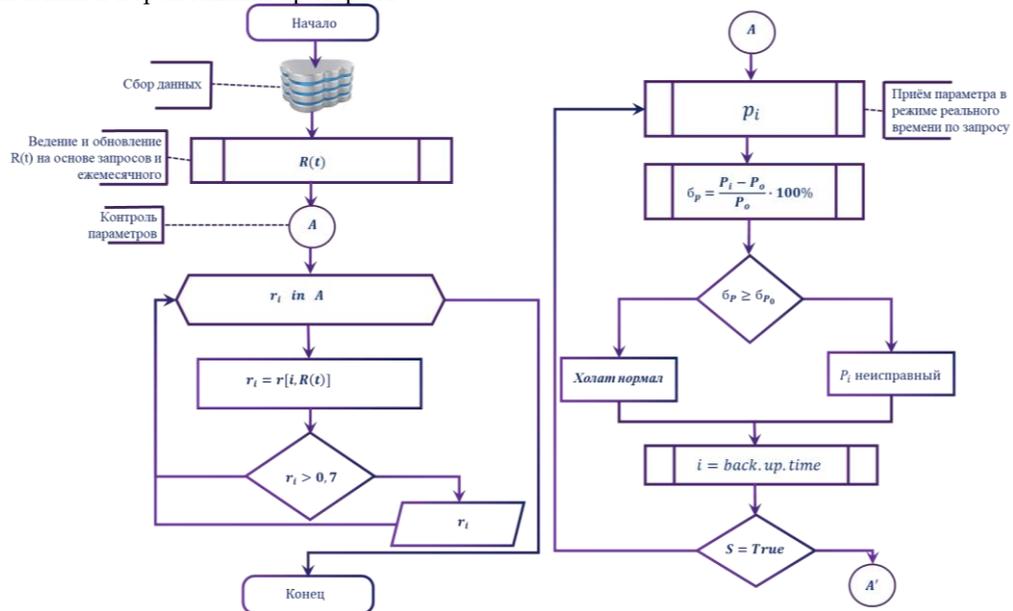


Рис. 4. Алгоритм динамического мониторинга и анализа факторов, влияющих на надёжность инверторов в крупномасштабных солнечных электростанциях

Fig. 4. Algorithm for Dynamic Monitoring and Analysis of Factors Affecting the Reliability of Inverters in Large-Scale Solar Power Plants

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для постоянного прогнозирования указанных параметров в режиме реального времени и своевременного выявления аномальных процессов была применена модель неконтролируемого мониторинга технического состояния на основе автокодировщиков (Unsupervised Health Monitoring Using Autoencoders). Разработанная модель диагностики на основе автокодировщика обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с традиционными методами мониторинга. Прежде всего, модель функционирует на основе обучения без учителя (unsupervised learning), что позволяет выявлять аномалии даже при отсутствии заранее размеченных данных о сбоях. Она учитывает сложные нелинейные взаимосвязи между множеством параметров (напряжение, ток, температура, THD, влажность и др.) и обеспечивает оценку степени отклонения наблюдаемого сигнала от нормы в режиме реального времени. В то время как традиционные методы, такие как

БПФ (быстрое преобразование Фурье) или термография, фокусируются на анализе отдельных физических величин и зачастую требуют специализированного оборудования либо ручной обработки, автокодировщик может выступать как автономный интеллектуальный элемент в составе комплексных систем мониторинга. Это способствует повышению эффективности технического обслуживания и предупреждению аварийных ситуаций за счёт раннего выявления потенциальных отказов.

В процессе моделирования использовались эмпирические данные, полученные от реального инвертора, собранные с интервалом в 3 секунды в течение контрольного периода, что составило выборку из 100 наблюдательных точек. На рисунке 4 представлены шесть из них, выбранные в качестве примера (Рис. 5).

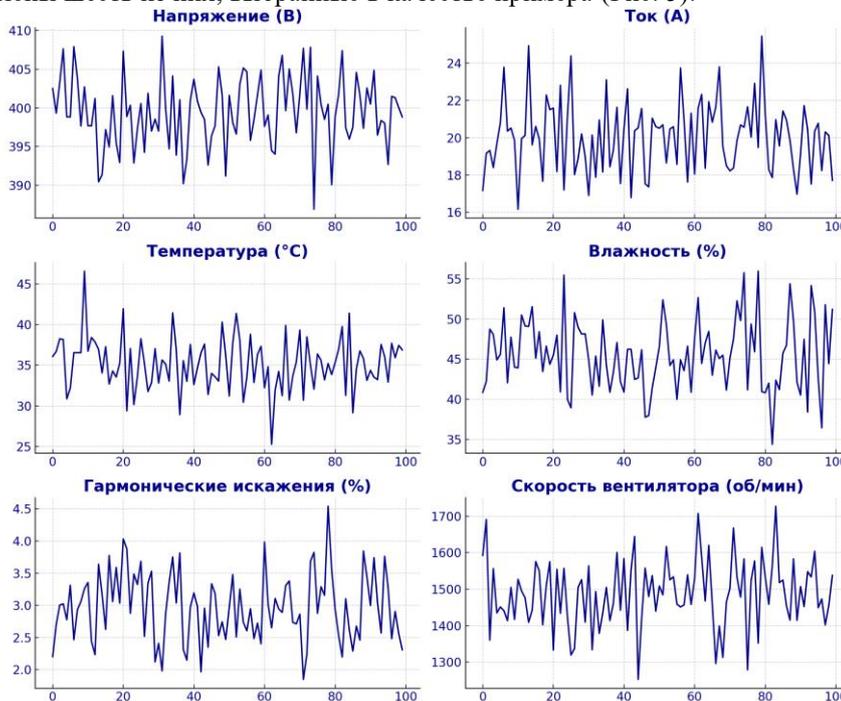


Рис. 5. Пример выборочных данных, использованных при моделировании

Fig. 5. Sample Data Used in the Modeling Process

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для анализа надёжности инверторов в крупномасштабных солнечных электростанциях в режиме реального времени была применена модель Autoencoder + Threshold-based Anomaly Detection. В этой модели в качестве входных параметров используются данные с сенсоров: напряжение, ток, температура, влажность, коэффициент гармонических искажений (THD) и др. Данный процесс реализуется на основе алгоритма, представленного на рисунке 6.

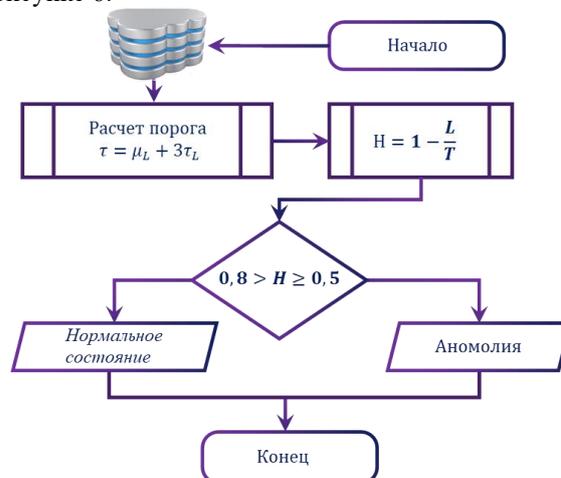


Рис. 6. Алгоритм оценки технического состояния инвертора на основе автокодировщика и порогового анализа

Fig. 6. Inverter Health Assessment Algorithm Based on Autoencoder and Threshold Analysis

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Автокодировщик обучается на нормальных данных и восстанавливает входной вектор  $\hat{X}$  из скрытого представления  $Z$ :

$$Z = f_{\text{enc}}(X), \quad \hat{X} = f_{\text{dec}}(Z)$$

Для каждой записи вычисляется ошибка реконструкции:

$$L = |X - \hat{X}|^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2$$

Пороговое значение ошибки (threshold) рассчитывается по статистическому правилу трех сигм:

$$\tau = \mu_L + 3\sigma_L$$

где  $\mu_L$  — среднее значение ошибки реконструкции на обучающих данных,  $\sigma_L$  — её стандартное отклонение. Если фактическая ошибка превышает  $\tau$ , наблюдение считается аномалией.

Для оценки технического состояния инвертора вводится индекс состояния (Health Index), рассчитываемый по формуле:

$$H = \max\left(0, 1 - \frac{L}{\tau}\right)$$

Значения  $H$  интерпретируются следующим образом:  $H \geq 0,8$  — нормальное состояние,  $0,5 \leq H < 0,8$  — необходим мониторинг,  $H < 0,5$  — потенциальная неисправность. Такая система позволяет в автоматическом режиме отслеживать деградацию оборудования и инициировать техническое обслуживание при снижении показателей надёжности.

Для анализа надёжности инверторов в крупномасштабных солнечных электростанциях в режиме реального времени была применена модель Autoencoder + Threshold-based Anomaly Detection. В этой модели в качестве входных параметров используются данные с сенсоров: напряжение, ток, температура, влажность, коэффициент гармонических искажений (THD) и скорость вентилятора. Автокодировщик обучается на нормальных данных и восстанавливает входной вектор  $\hat{X}$  из скрытого представления  $Z$ :

$$Z = f_{\text{enc}}(X), \quad \hat{X} = f_{\text{dec}}(Z)$$

Для каждой записи вычисляется ошибка реконструкции:

$$L = |X - \hat{X}|^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2$$

Пороговое значение ошибки (threshold) рассчитывается по статистическому правилу трех сигм:

$$\tau = \mu_L + 3\sigma_L$$

где  $\mu_L$  — среднее значение ошибки реконструкции на обучающих данных,  $\sigma_L$  — её стандартное отклонение. Если фактическая ошибка превышает  $\tau$ , наблюдение считается аномалией.

Для оценки технического состояния инвертора вводится индекс состояния (Health Index), рассчитываемый по формуле:

$$H = \max\left(0, 1 - \frac{L}{\tau}\right)$$

Значения  $H$  интерпретируются следующим образом:  $H \geq 0,8$  — нормальное состояние,  $0,5 \leq H < 0,8$  — необходим мониторинг,  $H < 0,5$  — потенциальная неисправность. Такая система позволяет в автоматическом режиме отслеживать деградацию оборудования и инициировать техническое обслуживание при снижении показателей надёжности.

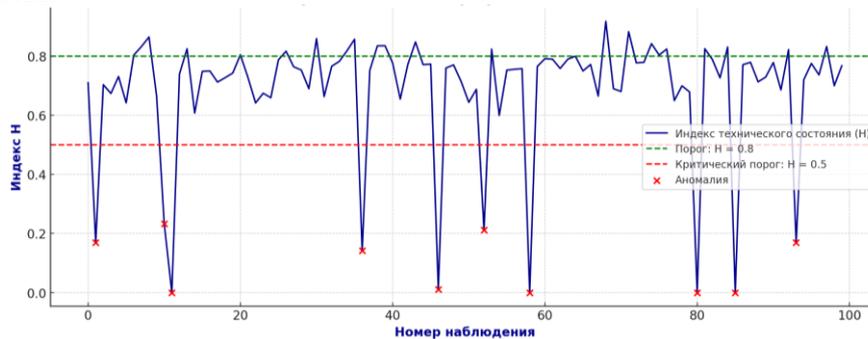


Рис. 7. График оценки состояния на основе автокодировщика Fig. 7. Health Status Assessment Graph Based on Autoencoder

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты данной модели представлены на рис. 7. На приведённом графике индекс технического состояния инвертора  $N$  оценивался в режиме реального времени на основе реконструкционных ошибок автокодировщика. Синяя линия отражает динамику индекса  $N$ , зелёная линия обозначает порог надёжности на уровне  $N = 0.8$ , соответствующий нормальному рабочему состоянию, а красная линия — критический уровень  $N = 0.5$ . Точки, при которых  $N < 0.5$ , интерпретируются как аномалии и помечаются красными маркерами. При их возникновении система мониторинга генерирует предупреждение, после чего может быть выполнен корреляционный анализ для определения причин отклонений. Данный подход позволяет надёжно отслеживать техническое состояние инвертора, заранее выявлять отказы и планировать профилактическое обслуживание. Данная процедура выполняется по всем параметрам, и значения, выходящие за установленные пределы, непрерывно отслеживаются и сопровождаются автоматическим предупреждением в режиме реального времени.

### **Выводы**

На основе проведенного исследования были сделаны следующие выводы:

1. Проведен системный анализ факторов, влияющих на надёжность инверторов в крупномасштабных солнечных электростанциях, с классификацией на электрические, тепловые, механические, атмосферные и эксплуатационные группы, что позволило выявить ключевые параметры, требующие мониторинга.
2. Разработана блок-схема архитектуры динамического анализа факторов надёжности инверторов, а также предложен алгоритм оценки технического состояния с применением технологии автокодировщиков и метода порогового обнаружения аномалий.
3. Установлена возможность внедрения сенсорных технологий и IoT-модулей для непрерывного мониторинга параметров, влияющих на отказоустойчивость инверторов, с учетом климатических и эксплуатационных условий.
4. Разработана и апробирована модель оценки технического состояния инверторов на основе Autoencoder + Threshold-based Anomaly Detection, обеспечивающая оперативное выявление потенциальных отказов и снижение эксплуатационных рисков за счет своевременного технического обслуживания.

### **Литература**

1. Kun.uz. O'zbekiston qayta tiklanuvchi energiya manbalari quvvatini 27 gigavattga oshirmoqchi [Электронный ресурс]. 16 ноября 2024 г. Доступно по: <https://www.kun.uz/news/2024/11/16/ozbekiston-qayta-tiklanuvchi-energiya-manbalari-quvvatini-27-gigavattga-oshirmoqchi>. (дата обращения: 20.05.2025).
2. Kaplani E., Roinila T. Reliability and performance degradation modeling of grid-connected photovoltaic inverters // *Solar Energy*. 2020. Vol. 207. Pp. 392–401. doi:10.1016/j.solener.2020.06.067
3. Jordan D.C., Smith R.M., Kurtz S.R. Photovoltaic failure and degradation modes // *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2017. Vol. 25, No. 4. Pp. 318–326. DOI: 10.1002/pip.2866.
4. Sahan B., Vergara A.M., Henze N., Engler A., Zacharias P. A comparative study of power converter topologies for photovoltaic systems // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008. Vol. 56, N5. Pp. 1925–1935. doi:10.1109/TIE.2008.2007522
5. Papadopoulos T.A., Hatzigiorgiou N.D. Dynamic performance analysis of grid-connected photovoltaic systems including inverter reliability // *Renewable Energy*. 2012. Vol. 43. Pp. 538–544. doi:10.1016/j.renene.2011.11.029
6. Li T., Tao T.S., Zhang R., Liu Z., Ma L., Sun J., Sun Y. Reliability evaluation of photovoltaic system considering inverter thermal characteristics // *Electronics*. 2021. Vol. 10, Article No. 1763. DOI: 10.3390/electronics10151763.
7. Kerekes T., Teodorescu R., Rodriguez P., Vazquez G., Aldabas E. Evaluation of the thermal loading of three-phase string inverters in photovoltaic applications // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2010. Vol. 25, No. 12. Pp. 2734–2741. DOI: 10.1109/TPEL.2010.2046003.
8. Rakhmonov I.U., Reymov K.M., Shayumova Z.M. The role information in power management tasks // *E3S Web Conf. Volume 139, 2019. Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2019) 01080. 1-3 p.* <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901080>.
9. Rakhmonov I.U., Nematov L.A., Niyozov N.N., Reymov K.M., Yuldoshev T.M. Power consumption management from the positions of the general system theory // *Journal of Physics: Conference Series. ICMSIT-2020. 1515 (2020) 022054* doi:10.1088/1742-6596/1515/2/022054.
10. Rakhmonov I.U., Kurbonov N.N. Analysis of automated software for monitoring energy consumption and efficiency of industrial enterprises // *E3S Web Conf. Volume 216. Rudenko International Conference on Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems (RSES 2020)* doi:10.1051/e3sconf/202021601178.

11. Schmid J., Hansen A.D., et al. Reliability of Photovoltaic Inverters – A Review of Failure Modes and Mitigation Techniques // International Energy Agency – IEA PVPS T13-12:2019.

12. Уколова Е.В., Воропай Н.И. Развитие метода backward/forward для исследования гибкости систем электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. № 2 (46). С. 24-35.

13. Герасимов Д.О., Сулов К.В. Системы имитационного моделирования мультиэнергетических объектов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. № 4 (48). С. 11-19.

14. Капанский А.А. Методы решения задач оценки и прогнозирования энергетической эффективности // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. № 2 (42). С. 103-115.

15. Performance analysis of grid-connected PV systems // Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference. – Dresden, Germany, 2006. – P. 4–8.

16. Li T., Tao T. S., Zhang R., Liu Z., Ma L., Sun J., Sun Y. Reliability evaluation of photovoltaic system considering inverter thermal characteristics // Electronics. – 2021. – Vol. 10. – Art. 1763. – DOI: 10.3390/electronics10151763.

17. Wardana F., Saputra A., Santoso A. Leads: A deep learning approach to revolutionizing gas plant maintenance with advanced anomaly detection technology // SPE International Conference. – 2025. – Paper № 224966-MS. – DOI: 10.2118/224966-MS

#### Автор публикации

**Рахмонов Икромжон Усмонович** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение» Ташкентского государственного технического университета, Ташкент, Узбекистан.

**Нийёзов Нуъмон Низомиддинович** – доктор философии по техническим наукам (PhD), доцент, доцент кафедры “Электроснабжение” Ташкентского государственного технического университета, Ташкент, Узбекистан.

**Курбонов Нурбек Нурулло угли** – доктор философии по техническим наукам (PhD), старший преподаватель кафедры «Электроснабжение» Ташкентского государственного технического университета, Ташкент, Узбекистан.

**Ахметова Римма Валентиновна** – канд. техн. наук, доцент, директор департамента образования Казанского государственного энергетического университета, Казань, Россия.

**Таслимов Абдурахим Дехканович** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электроснабжение» Ташкентского государственного технического университета, Ташкент, Узбекистан.

**Расулов Абдулхай Норходжаевич** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электроснабжение» Ташкентского государственного технического университета, Ташкент, Узбекистан.

#### References

1. Kun.uz. Uzbekistan plans to increase the capacity of renewable energy sources to 27 gigawatts [Electronic resource]. November 16, 2024. Available at: <https://www.kun.uz/news/2024/11/16/ozbekiston-qayta-tiklanuvchi-energiya-manbalari-quvvatini-27-gigavattga-oshirmoqchi> (accessed: 20.05.2025).

2. Kaplani E, Roinila T. Reliability and performance degradation modeling of grid-connected photovoltaic inverters. Solar Energy. 2020;207:392–401. doi:10.1016/j.solener.2020.06.067

3. Jordan DC, Smith RM, Kurtz SR. Photovoltaic failure and degradation modes. Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 2017; 25(4):318–326. doi:10.1002/pip.2866.

4. Sahan B, Vergara AM, Henze N, Engler A, Zacharias P. A comparative study of power converter topologies for photovoltaic systems. IEEE Trans Ind Electron. 2008;56(5):1925–1935. doi:10.1109/TIE.2008.2007522

5. Papadopoulos TA, Hatzigiorgiou ND. Dynamic performance analysis of grid-connected photovoltaic systems including inverter reliability. Renewable Energy. 2012;43:538–544. doi:10.1016/j.renene.2011.11.029

6. Li T, Tao TS, Zhang R, Liu Z, Ma L, Sun J, Sun Y. Reliability evaluation of photovoltaic system considering inverter thermal characteristics. *Electronics*. 2021; 10(1763):1–18. doi:10.3390/electronics10151763.
7. Kerekes T, Teodorescu R, Rodriguez P, Vazquez G, Aldabas E. Evaluation of the thermal loading of three-phase string inverters in photovoltaic applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2010; 25(12):2734–2741. doi:10.1109/TPEL.2010.2046003.
8. Rakhmonov I.U., Reymov K.M., Shayumova Z.M. The role information in power management tasks//E3S Web Conf. Volume 139, 2019. Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2019) 01080. 1-3 p. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901080>.
9. Rakhmonov I.U., Nematov L.A., Niyozov N.N., Reymov K.M., Yuldoshev T.M. Power consumption management from the positions of the general system theory // *Journal of Physics: Conference Series*. ICMSIT-2020. 1515 (2020) 022054 doi:10.1088/1742-6596/1515/2/022054.
10. Rakhmonov, I.U., Kurbonov, N.N. Analysis of automated software for monitoring energy consumption and efficiency of industrial enterprises // *E3S Web of Conferences*. – 2020. – Vol. 216. – RSES 2020. – Article ID: 01178. – DOI: 10.1051/e3sconf/202021601178.
11. Schmid J, Hansen AD, et al. Reliability of photovoltaic inverters: a review of failure modes and mitigation techniques. IEA PVPS Report T13-12:2019. International Energy Agency. 2019; 1–46.
12. Ukolova, E.V., Voropay, N.I. Development of the backward/forward method for studying the flexibility of power supply systems // *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*. – 2021. – No. 2 (46). – P. 24–35. (In Russian)
13. Gerasimov, D.O., Suslov, K.V. Simulation modeling systems for multi-energy facilities // *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*. – 2020. – No. 4 (48). – P. 11–19. (In Russian)
14. Kapanskiy, A.A. Methods for assessment and forecasting of energy efficiency // *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*. – 2019. – No. 2 (42). – P. 103–115. (In Russian)
15. Performance analysis of grid-connected PV systems // *Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference*. – Dresden, Germany, 2006. – P. 4–8.
16. Li T, Tao T. S., Zhang R., Liu Z., Ma L., Sun J., Sun Y. Reliability evaluation of photovoltaic system considering inverter thermal characteristics // *Electronics*. – 2021. – Vol. 10. – Art. 1763. – DOI: 10.3390/electronics10151763.
17. Wardana F., Saputra A., Santoso A. Leads: A deep learning approach to revolutionizing gas plant maintenance with advanced anomaly detection technology // *SPE International Conference*. – 2025. – Paper № 224966-MS. – DOI: 10.2118/224966-MS

#### **Authors of the publication**

***Ikromjon Usmonovich Rakhmonov*** – Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan.

***Nu'mon Nizomidinovich Niyozov*** – Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan.

***Nurbek Nurullo ugli Kurbanov*** – Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan.

***Rimma Valentinovna Akhmetova*** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

***Abdurakhim Dekhanovich Taslimov*** – Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan.

***Abdulkhay Norhodzhaevich Rasulov*** – Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan.

*Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.*

***Получено*** **28.05.2025 г.**

***Отредактировано*** **02.06.2025 г.**

***Принято*** **10.06.2025 г.**