



Марказлашган инверторларнинг узок муддатли ишлаш ишончилигини оширишга таъсир этувчи омилларни аниқлаш

Икромжон У. Рахмонов¹, Нўмон Н. Ниёзов^{1,а)}

¹ DSc, prof., Toshkent davlat texnika universiteti, 100095, Uzbekistan; ilider1987@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2076-5919>

^{1,а)} PhD, dots. Toshkent davlat texnika universiteti, 100095, Uzbekistan; nomon.niyozov_2422@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-1031-3460>

Долзарблик: қайта тикланувчи энергия манбаларига асосланган электр таъминоти тизимларида марказлашган инверторлар асосий функционал бўғин ҳисобланади. Уларнинг ишончли ва барқарор ишлаши электр энергияси ишлаб чиқариш самарадорлиги ҳамда иктисодий барқарорликни таъминлашда ҳал қилувчи аҳамиятга эга. Реал эксплуатация шароитида инверторлар юклама ўзгариши, гармоник бузилишлар, тармоқ кучланиши сифати, иссиқлик режимлари, механик таъсирлар ва техник хизмат кўрсатиш даражаси таъсирида ишлайди. Ушбу омиллар компонентлар деградациясини тезлаштириб, носозликлар эҳтимолини оширади ва қолдиқ хизмат муддатини қисқартиради. Шу сабабли марказлашган инверторлар ишончилигига таъсир этувчи электр, термик, механик ва эксплуатацион омилларни аниқлаш ҳамда уларнинг ўзаро боғлиқлигини корреляцион таҳлил асосида баҳолаш муҳим илмий-амалий аҳамиятга эга ҳисобланади.

Мақсад: марказлашган инверторларнинг узок муддатли ишончилигига таъсир этувчи асосий электр, термик, механик ва эксплуатацион омилларни аниқлаш; уларнинг ишончилик индекси ва қолдиқ хизмат муддати (RUL) билан ўзаро боғлиқлигини корреляцион таҳлил асосида баҳолаш ҳамда деградация жараёнларига энг катта таъсир кўрсатувчи доминант параметрлар иерархиясини шакллантиришдан иборат.

Усуллар: инвертор эксплуатацияси учун муҳим бўлган параметрларни IEC, IEEE, GOST ва ISO стандартлари асосида танлаш; ток, кучланиш, кувват, THD, ҳарорат, вибрация ва техник хизмат кўрсатиш кўрсаткичларини мониторинг тизимлари орқали йиғиш; ҳарорат, юклама ва гармоник таъсирларни математик ифодалар асосида баҳолаш; ишончилилик функцияси $R(t)$, MTBF ва носозликлар интенсивлиги λ ни ҳисоблаш; параметрлар ўртасидаги боғлиқликни Пирсон (r) ва Спирман (ρ) корреляция коэффицентлари орқали таҳлил қилиш; натижаларни иссиқлик хариталари (heatmap) ёрдамида визуаллаштириш; доминант омилларни ажратиш ва уларнинг ишончиликлка таъсирини комплекс баҳолаш.

Натижалар: тадқиқот натижасида марказлашган инверторлар ишончилигига таъсир этувчи асосий омиллар аниқланди ва уларнинг ўзаро боғлиқлиги миқдорий баҳоланди. Корреляцион таҳлилга кўра, ички ҳарорат (T_{in}), гармоник бузилишлар (THD), ҳарорат цикллари сони (N_{cycle}), ҳарорат ўзгариш тезлиги (dT/dt) ва кучланиш оғиши (ΔU) ишончилилик индекси билан кучли тесқари боғлиқликка эга экани аниқланди. Иссиқлик харитаси натижалари T_{in} параметри деградациянинг марказий драйвери эканини тасдиқлади. Совитиш тизими самарадорлиги ва техник хизмат сифати ишончилиқни оширишда муҳим омил экани кўрсатилди. Таклиф этилган ёндашув инверторларнинг қолдиқ хизмат муддатини прогноз қилиш, профилактик хизматни оптималлаштириш ва эксплуатацион хавфларни камайитириш имконини беради.

Калит сўзлар: марказлашган инвертор, ишончилилик, қолдиқ хизмат муддати (RUL), корреляцион таҳлил, термик деградация, гармоник бузилишлар, THD, ишончилилик индекси, ҳарорат цикллари, совитиш тизими, вибрация, техник хизмат кўрсатиш, SCADA/IoT, мониторинг, MTBF, деградация модели, эксплуатацион омиллар.

Выявление факторов, влияющих на повышение долгосрочной эксплуатационной надёжности централизованных инверторов.

Икромжон У. Рахмонов¹, Нўмон Н. Ниёзов^{1,а)}

¹ DSc, проф., Ташкентский государственный технический университет, 100095, Uzbekistan; ilider1987@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2076-5919>

^{1, а)} PhD, доц. Ташкентский государственный технический университет, 100095, Uzbekistan; nomon.niyozov_2422@mail.ru <http://orcid.org/0000-0002-1031-3460>

Актуальность: в системах электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии основным функциональным элементом являются централизованные инверторы. Их надёжная и стабильная работа играет решающую роль в обеспечении надёжности выработки электроэнергии и экономической эффективности. В реальных условиях эксплуатации инверторы подвергаются воздействию колебаний нагрузки, гармонических искажений, качества сетевого напряжения, тепловых режимов, механических воздействий, а также от уровня технического обслуживания. Эти факторы ускоряют деградацию компонентов инверторов, повышают вероятность отказов и сокращают остаточный срок службы. В связи с этим выявление электрических, тепловых, механических и эксплуатационных факторов, влияющих на

For citation: I.U. Rakhmonov, N.N. Niyozov. Identification of Factors Influencing the Improvement of Long-Term Operational Reliability of Centralized Inverters. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 1, pp. 69-77.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19704956>

Received: 12.10.2025

Revised: 8.11.2025

Accepted: 21.02.2026

Published: 26.03.2026

Copyright: © Ikromjon U. Rakhmonov, Numon N. Niyozov, 2026. Submitted to problems of energy and sources saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



надёжность централизованных инверторов, а также оценка их взаимосвязи на основе корреляционного анализа имеют важное научно-практическое значение.

Цель: выявление основных электрических, тепловых, механических и эксплуатационных факторов, влияющих на долгосрочную надёжность централизованных инверторов; оценка их взаимосвязи с индексом надёжности и остаточным сроком службы (RUL), на основе корреляционного анализа; формирование иерархии доминирующих параметров, оказывающих наибольшее влияние на процессы деградации.

Методы: ключевые эксплуатационные параметры отбирались на основе стандартов IEC, IEEE, GOST и ISO. Сбор данных по току, напряжению, мощности, суммарному коэффициенту гармонических искажений (THD), температуре, вибрации и показателям технического обслуживания осуществлялся с использованием систем мониторинга. Тепловые, нагрузочные и гармонические воздействия оценивались с применением математических моделей. Рассчитывались функция надёжности $R(t)$, среднее время наработки на отказ (MTBF) и интенсивность отказов λ . Взаимосвязи между параметрами анализировались с использованием коэффициентов корреляции Пирсона (r) и Спирмена (ρ). Результаты визуализировались с помощью тепловых карт (heat map). Определялись доминирующие факторы и комплексно оценивалось их влияние на надёжность.

Результаты: в ходе исследования были выявлены основные факторы, влияющие на надёжность централизованных инверторов, количественно оценены их взаимосвязи. Корреляционный анализ показал, что внутренняя температура (T_{in}), гармонические искажения (THD), количество температурных циклов (N_{cycle}), скорость изменения температуры (dT/dt) и отклонения напряжения (ΔU) имеют сильную отрицательную корреляцию с индексом надёжности. Анализ тепловых карт подтвердил, что параметр T_{in} является центральным драйвером деградации. Установлено, что эффективность системы охлаждения и качество технического обслуживания являются ключевыми факторами повышения надёжности. Предложенный подход позволяет прогнозировать остаточный срок службы инверторов, оптимизировать профилактическое обслуживание и снижать эксплуатационные риски.

Ключевые слова: централизованный инвертор, надёжность, остаточный срок службы (RUL), корреляционный анализ, термическая деградация, гармонические искажения, THD, индекс надёжности, температурные циклы, система охлаждения, вибрация, техническое обслуживание, SCADA/IoT, мониторинг, MTBF, модель деградации, эксплуатационные факторы.

Identification of Factors Influencing the Improvement of Long-Term Operational Reliability of Centralized Inverters

Ikromjon U. Rakhmonov¹, Numon N. Niyozov^{1,a)}

¹ DSc, prof., Tashkent State Technical University, 100095, Uzbekistan; ilider1987@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2076-5919>

^{1a)} PhD, Assoc. Prof. Tashkent State Technical University, 100095, Uzbekistan; nomon.niyozov_2422@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-1031-3460>

Relevance: in power supply systems based on renewable energy sources, centralized inverters represent a key functional component. Their reliable and stable operation plays a decisive role in ensuring the efficiency of electricity generation and economic sustainability. Under real operating conditions, inverters are influenced by load variations, harmonic distortions, grid voltage quality, thermal regimes, mechanical impacts, and maintenance levels. These factors accelerate component degradation, increase the probability of failures, and reduce the remaining useful life. Therefore, identifying the electrical, thermal, mechanical, and operational factors affecting the reliability of centralized inverters and evaluating their interrelationships through correlation analysis is of significant scientific and practical importance.

Aim: to identify the main electrical, thermal, mechanical, and operational factors influencing the long-term reliability of centralized inverters; to evaluate their relationships with the reliability index and remaining useful life (RUL) using correlation analysis; and to establish a hierarchical structure of dominant parameters that have the greatest impact on degradation processes.

Methods: key operational parameters were selected based on IEC, IEEE, GOST, and ISO standards. Current, voltage, power, total harmonic distortion (THD), temperature, vibration, and maintenance indicators were collected using monitoring systems. Thermal, load, and harmonic effects were evaluated using mathematical models. The reliability function $R(t)$, mean time between failures (MTBF), and failure intensity λ were calculated. Relationships between parameters were analyzed using Pearson (r) and Spearman (ρ) correlation coefficients. The results were visualized using heat maps. Dominant factors were identified, and their impact on reliability was evaluated using a comprehensive approach.

Results: the study identified the main factors affecting the reliability of centralized inverters, and their interrelationships were quantitatively evaluated. Correlation analysis revealed that internal temperature (T_{in}), harmonic distortion (THD), number of temperature cycles (N_{cycle}), rate of temperature change (dT/dt), and voltage deviation (ΔU) exhibit strong negative correlations with the reliability index. Heat map analysis confirmed that T_{in} is the central driver of degradation. The efficiency of the cooling system and the quality of maintenance were shown to be critical factors in improving reliability. The proposed approach enables prediction of the remaining useful life, optimization of preventive maintenance, and reduction of operational risks.

Keywords: centralized inverter, reliability, remaining useful life (RUL), correlation analysis, thermal



degradation, harmonic distortion, THD, reliability index, temperature cycles, cooling system, vibration, maintenance, SCADA/IoT, monitoring, MTBF, degradation model, operational factors.

1. Кириш (Introduction)

Марказлашган инверторлар қайта тикланувчи энергия манбаларига асосланган электр таъминоти тизимларининг асосий функционал бўғини ҳисобланиб, уларнинг узоқ муддатли ишончли ишлаши энергетик тизим барқарорлиги ва иқтисодий самарадорликни таъминлашда ҳал қилувчи аҳамиятга эга. Реал эксплуатация шароитида инверторлар электр юкламаларининг ўзгарувчанлиги, тармоқ кучланиши сифати, гармоник бузилишлар, ҳарорат режимлари, механик таъсирлар ҳамда техник хизмат кўрсатиш даражаси каби кўплаб ўзаро боғлиқ омиллар таъсирида фаолият юритади. Ушбу омиллар инвертор компонентларида деградация жараёнларини тезлаштириши, носозликлар эҳтимolini ошириши ва қолдиқ хизмат муддатини қисқартириши мумкин. Шу сабабли, инверторларнинг узоқ муддатли ишлаш ишончилигини оширишга таъсир этувчи асосий электр, термик, механик ва эксплуатацион омилларни аниқлаш ҳамда уларнинг ўзаро боғлиқлигини илмий асосланган усуллар, жумладан корреляцион таҳлил орқали баҳолаш долзарб илмий–амалий вазифа ҳисобланади [1-3].

Марказлашган инверторларнинг узоқ муддатли ишлаш ишончилигини оширишга таъсир этувчи омилларни аниқлаш учун дастлаб IEC, IEEE, GOST ва ISO каби халқаро ва миллий стандартларда инвертор эксплуатацияси учун критик деб белгиланган параметрлар инobatта олиниб, ишлаб чиқарувчиларнинг техник паспортлари ва дерейтинг тавсиялари таҳлил қилинди [4,5].

2. Материал ва усуллар (Materials and Methods)

Ушбу таҳлиллар асосида реал саноат эксплуатациясида қайд этиладиган носозликлар статистикаси ва илмий манбаларда келтирилган деградация механизмлари (термик, электр ва гармоник таъсир, совитиш тизими самарадорлиги) ҳисобга олинди ва замонавий мониторинг тизимлари орқали узлуксиз ўлчаниши мумкин бўлган параметрлар устувор танланиб, уларнинг ишончлилик индекси (Health Index, RUL) билан боғлиқлиги корреляцион таҳлил орқали текшириш имконияти таъминланди.

1-жадвал. Инвертор ишончилигига таъсир этувчи омиллар

Table 1. Factors Affecting Inverter Reliability

№	Омил	Ўлчов бирлиги	Танлаш асоси	Таснифи
1	Ток (I)	A	Юклама даражаси ва IGBT қизиши билан боғлиқ	Электр
2	Кучланиш (U)	B	IEC/GOST ±10 % талаби	
3	Актив қувват (P)	кВт	Номинал ва реал юклама нисбати	
4	Юкланиш коэффициенти (η_n)	%	Дерейтинг ва ортиқча юкланиш хавфи	
5	Кучланиш оғиши (ΔU)	%	Тармоқ барқарорлиги индикатори	
6	THD (гармоник бузилиш)	%	IGBT ва конденсатор деградацияси	
7	Ички ҳарорат (T_{in})	°C	Асосий деградация омили	Термик
8	Ҳарорат фарқи (ΔT)	°C	Совитиш тизими самарадорлиги	
9	Ҳарорат ўзгариш тезлиги dT/dt	°C/c	Иссиқлик таъсири хавфи	
10	Ҳарорат цикллари сони (N_{cycle})	дона	Термик таъсир хавфи	
11	Fan_{RPM}	айл/мин	Совитиш тизими ҳолати	
11	Ҳарорат коэффициенти (k_T)	–	Қувватни пасайтириш талаби	Атмосферик
12	Баландлик коэффициенти (k_H)	–	Совитиш самарадорлиги	
13	Коррозия даражаси	ISO C1–C5	Атроф–муҳит таъсири	
14	УФ–нурланиш	–	Корпус ва изоляция қариши	Механик
16	Вибрация (a)	м/с ²	Пайванд ва контактлар шикасти	
17	Техник хизмат коэффициенти (K_{TO})	%	Профилактика сифати	Эксплуатацион
18	Дастурий хатолар частотаси (λ_{PO})	1/вақт	Firmware барқарорлиги	
19	Мониторинг қамрови (K_{mon})	%	Эрта аниқлаш имконияти	
20	Ишончлилик индекси (H)	–	Умумий техник ҳолат баҳоси	



Юкламани ўзгариши инвертор орқали ўтаётган ток, кучланиш ва актив қувват параметрлари билан боғлиқ [6,7]. Ток ва кучланишнинг номинал қийматлари $\pm 10\%$ чегарасида бўлиши лозим. Қувват инвертор юкламасига қараб баҳоланади. Токнинг ўртача қиймати куйидаги формула асосида ҳисобланади:

$$I_{\text{avg}} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt. \quad (1)$$

Актив қувват — сифатида:

$$P = I \cdot U \cdot \cos \varphi. \quad (2)$$

Инвертор қувватини баҳолаш унинг номинал қуввати (P_0) билан ҳақиқий истеъмол қилинаётган қувват ($P_{\text{реал}}$) нисбати асосида амалга оширилади. Ушбу кўрсаткич юкланиш коэффициентини (η_n) ифодалайди:

$$\eta_n = \frac{P_{\text{реал}}}{P_0} \times 100\%. \quad (3)$$

Инверторларни самарали ва ишончли ишлатиш учун улар одатда 30% дан 90% гача юкланиш оралиғида ишлаши лозим бўлади. Бу ораликнинг 100% дан ошиш эса носозликларнинг содир бўлиш хавфини оширади. Реал шароитларда ҳарорат ва денгиз сатҳидан баландлик каби ташқи омиллар инверторнинг қувват тавсифларига таъсир қилади. Ишлаб чиқарувчилар икки асосий тузатувчи коэффициентни кўрсатадилар: k_T — ҳарорат коэффициенти ва k_H — баландлик коэффициенти. Ҳарорат 40°C дан юқори бўлганда, айниқса IGBT–транзисторлар каби асосий компонентларнинг қизиб кетиши мумкин. Масалан, 50°C да $k_T \approx 0,90$, яъни қувватни 90% гача камайтириш лозим.

Ҳисоблаш учун куйидаги формула қўлланилади: $k_T = 1 - \alpha_T \cdot (T - 40)$, бу ерда $\alpha_T \approx 0,01$ — пасайтириш коэффициенти. Катта баландликларда ҳаво зичлигининг пасайиши туфайли совитиш самарадорлиги камаяди. 1000 м баландликда $k_H = 1$, 2000 м да эса $k_H \approx 0,90$ бўлади. Ҳисоблаш ифодаси куйидагича: $k_H = 1 - \alpha_H \cdot (h - 1000)$, бу ерда $\alpha_H \approx 0,0001$ — ҳар 500 м учун 1% га пасайишни кўрсатувчи коэффициент [8]. Шунга мувофиқ, якуний ишчи қувват куйидагича аниқланади:

$$P_{\text{эфф}} = P_0 \cdot k_T \cdot k_H. \quad (4)$$

Тармоқ кучланишининг барқарорлиги инвертор ишида ҳал қилувчи омил ҳисобланади. ИЕС ва GOST стандартларига мувофиқ, рухсат этилган оғиш номинал қийматдан $\pm 10\%$ дан ошмаслиги лозим [11]. Кучланиш тебранишларини ҳисоблаш формуласи:

$$\Delta U = \frac{U_{\text{макс}} - U_{\text{мин}}}{U_{\text{ном}}} \times 100\%. \quad (5)$$

ИЕС 61000–2–4 ва IEEE 519 стандартларига мувофиқ, кучланиш учун рухсат этилган THD даражаси — 5% гача, ток учун эса — $8\text{--}10\%$ гача. Ҳисоблаш формуласи:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \times 100\%. \quad (6)$$

Тармоқдан узилиш таъминот кучланишининг кескин йўқолиши натижасида содир бўлади. ГОСТ 32144:2013 стандартига мувофиқ, бундай носозликлар сони бир йилда 10 тадан ошмаслиги лозим. Саноат эксплуатацияси шароитида ушбу кўрсаткич реал вақт режимида мониторинг тизимларида қайд этилади [9].

Термик параметрлар инверторлар ишончли ишлашини таъминлашда ҳал қилувчи аҳамиятга эга [10]. Қурилма ичида иссиқликнинг тўпланиши ички ҳароратнинг ошиши билан боғлиқ бўлиб, нормал диапазон -20°C дан $+60^\circ\text{C}$ гача, оптимал иш режими эса $25\text{--}45^\circ\text{C}$ чегарасида ҳисобланади. Ҳароратнинг ортиб кетиши куйидаги ифода орқали баҳоланади:

$$\Delta T = T_{\text{ички}} - T_{\text{ташқи}}; \quad (7)$$

бу ерда $T_{\text{ички}}$ — компонентлар ҳарорати; $T_{\text{ташқи}}$ — атроф–муҳит ҳарорати. Совитиш тизими носоз бўлганда ҳарорат градиентининг сезиларли даражада ортиб кетиши кузатилади ва агар $\Delta T > 20^\circ\text{C}$ бўлса, бу вентиляция ёки радиаторлар самарадорлигининг пасайганини кўрсатади.

Термик барқарорликни баҳолаш учун вақт бўйича ҳосила ҳам қўлланилади: $dT(t)/dt \leq 5^\circ\text{C}/\text{с}$, бунда ушбу чегара қийматдан ошиш хавфли иссиқлик таъсирини англатади.

Ниҳоят, кўп маротабалик ҳарорат цикллари пайвандланган жойлари ва бошқа материалларда термик жиҳатдан эскиришни келтириб чиқариши мумкин. Критик цикллар сонини тахминан куйидаги формула орқали ҳисоблаш мумкин:

$$N_{\text{цикл}} = \frac{T_{\text{макс}} - T_{\text{мин}}}{\Delta T_{\text{крит}}}; \quad (8)$$

бу ерда $\Delta T_{\text{крит}}$ — ишончли ишлаш учун рухсат этилган ҳарорат фарқи. Шу тариқа, ҳароратни ва унинг динамикасини мониторинг қилишга асосланган термик таҳлил инвертор компонентларининг деградациясини олдини олиш учун зарур ҳисобланади.

Инверторлар ишончилигига таъсир этувчи механик омиллар қаторига асосан вибрациялар, коррозия, шунингдек ультрабинафша нурланиш таъсири ва механик шикастланишлар қиради



[11]. Вибрацион юкламалар, одатда, $0,5g$ ($g \approx 9,81$, тахминан $4,9 \text{ м/с}^2$) дан ошмаслиги лозим ва куйидаги формула бўйича ҳисобланади:

$$a = A \cdot \omega; \quad (9)$$

бу ерда A — амплитуда; $\omega = 2\pi f$ — бурчакли частота. Вибрацияларнинг рухсат этилган даражаси эксплуатация шароитлари ва ускуна корпусининг барқарорлигига боғлиқ.

Коррозия фаоллиги ва УФ–нурланиш таъсирига келсак, улар автоматик равишда назорат қилинмайди, балки регламентли текширувлар доирасида ходимлар томонидан баҳоланади. Масалан, бир ой давомида ҳафтасига бир марта. Ушбу баҳолаш натижалари журналда ёки рақамли рўйхатга олиш тизимида қайд этилади ва кейинчалик деградация динамикасини аниқлаш учун таҳлил қилинади. Коррозия даражаси ISO 9223 стандартига мувофиқ (C1–C5 тоифалар) таснифланади, ультрабинафша нурланишга чидамлик эса корпус химоя даражасига (масалан, IP65 ва ундан юқори) боғлиқ [12]. Механик шикастланишлар мавжудлиги ҳам визуал кўрик орқали аниқланади ва усқунани комплекс диагностика қилишда ҳисобга олинади.

Эксплуатацион омиллар, жумладан техник хизмат кўрсатиш сифати, дастурий носозликлар, мониторинг тизимининг йўқлиги, нотўғри ўрнатиш ва компонентлар сифатининг пастлиги инверторлар ишончилигининг пасайишига олиб келувчи асосий сабаблардан ҳисобланади. Техник хизмат кўрсатиш сифати регламентли тартиб–таомилларни бажариш кўрсаткичи орқали миқдорий баҳоланиши мумкин:

$$K_{ТО} = \frac{N_{\text{баж}}}{N_{\text{режа}}} \times 100 \% ; \quad (10)$$

бу ерда $N_{\text{баж}}$ — бажарилган техник хизмат кўрсатишлар сони;

$N_{\text{режа}}$ — режалаштирилган тартиб–таомиллар сони.

Дастурий хатолар лог–файлларни таҳлил қилиш орқали аниқланиб, уларнинг частотаси эса куйидагича ҳисобланади:

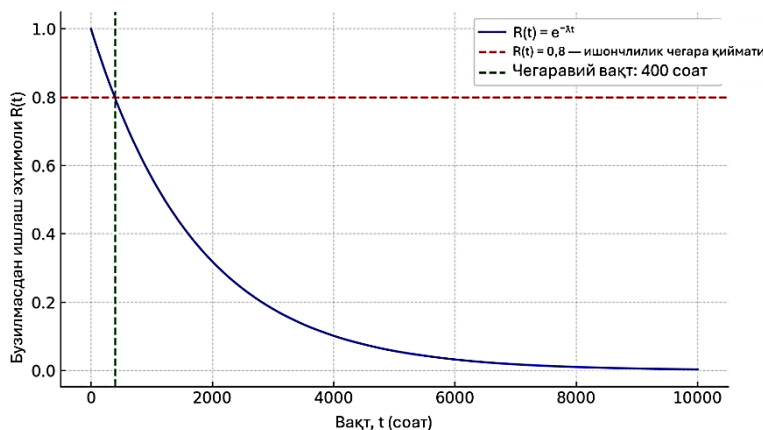
$$\lambda_{\text{ПО}} = \frac{N_{\text{хат}}}{T_{\text{мон}}} ; \quad (11)$$

бу ерда $N_{\text{хат}}$ — қайд этилган хатолар сони; $T_{\text{мон}}$ — мониторинг даври. Лог–файлларда қайд этиладиган хатоларнинг минимал даражада сақланиши ва дастурий таъминот (firmware)ни мунтазам янгилаб бориш ўрнатилган дастурий таъминотнинг ишончли ишлаши учун энг муҳим шартлардан ҳисобланади.

Мониторинг тизимининг мавжуд эмаслиги қисман қўлбола назорат орқали қопланиши мумкин. Бироқ замонавий эксплуатация шароитида Modbus, MQTT ёки SCADA протоколлари асосида телеметрияни жорий этиш зарур ҳисобланади. Мониторинг қамрови даражаси куйидаги индекс орқали ифодаланиши мумкин [11,12]:

$$K_{\text{мон}} = \frac{n_{\text{мон}}}{n_{\text{умум}}} \times 100 \% ; \quad (12)$$

бу ерда $n_{\text{мон}}$ — назорат остидаги параметрлар сони, $n_{\text{умум}}$ — критик параметрларнинг умумий сони.



1-расм. Марказлашган инверторларнинг қолдиқ хизмат муддати (RUL)ни ҳисобга олган ҳолдаги график

Figure 1. Graph Considering the Remaining Useful Life (RUL) of Centralized Inverters

$$R(t) = e^{-\lambda t} ; \quad (13)$$

бу ерда λ — носозликлар интенсивлиги (1/соат ёки 1/суткада); у куйидаги ифода билан аниқланади:

$$\lambda = \frac{N_{\text{иш.чик.}}}{T_{\text{умум}}} ; \quad (14)$$



бу ерда $N_{\text{иш.чиқ}}$ — кайд этилган носозликлар сони; $T_{\text{умум}}$ — инверторнинг умумий иш вақти (соат ёки кунларда).

Амалдаги стандартларга мувофиқ, ишончлилик функцияси $R(t)$ қиймати камида 80 % (яъни $R(t) \geq 0,8$) бўлиши лозим бўлиб, бу ишончли эксплуатация чегараси деб ҳисобланади. Ушбу кўрсаткич эксплуатация муҳити, техник хизмат кўрсатиш даражаси ва компонентлар сифатига боғлиқ. MTBF кўрсаткичи қанчалик юқори бўлса, λ қиймати шунчалик кичик бўлади ва $R(t)$ ишончилиги шунча юқори бўлади. Шу тарика, идеал ҳолатда $R(t)$ қиймати 1 га интилиши лозим [9].

3. Натижа ва муҳокама (Result and discussion)

Юқорида таъкидланганидек, амалиётда инверторларнинг ишончилиги ташқи муҳит, электр юклараси, иссиқлик режимлари ва эксплуатацион омиллар билан боғлиқ кўп омилли таъсирлар натижасида шаклланади. Шу боис, инвертор ишончилигини оширишда омилларни алоҳида эмас, балки улар ўртасидаги ўзаро боғлиқликни аниқлаш муҳим аҳамиятга эга. Пирсон ва Спирман корреляция коэффицентлари параметрлар ўртасидаги боғлиқликни миқдорий баҳолашда кенг қўлланиладиган оддий статистик усуллар ҳисобланади. Пирсон корреляцияси икки ўзгарувчи ўртасидаги чизиқли боғлиқлик даражасини баҳолайди ва асосан нормал тақсимланган, узлуксиз қийматларга эга маълумотлар учун мос келади. Унинг қиймати -1 дан $+1$ гача бўлиб, қийматнинг модул жиҳатдан катталаниши боғлиқликнинг кучайганини англатади. Спирман корреляцияси эса ўзгарувчилар ўртасидаги монотон (чизиқли бўлмаган) боғлиқликни аниқлашга хизмат қилади ва маълумотларнинг ранглари (rank) асосланади, шу сабабли у четлпшишлар ва нормал тақсимланишдан оғишларга нисбатан барқарорроқ ҳисобланади. Инверторлар эксплуатациясида Пирсон корреляцияси параметрлар ўртасидаги тўғридан-тўғри чизиқли таъсирни, Спирман корреляцияси эса деградация жараёнларида юзага келадиган ночизиқли ва босқичма-босқич ўзгариш тенденцияларини аниқлаш имконини беради.

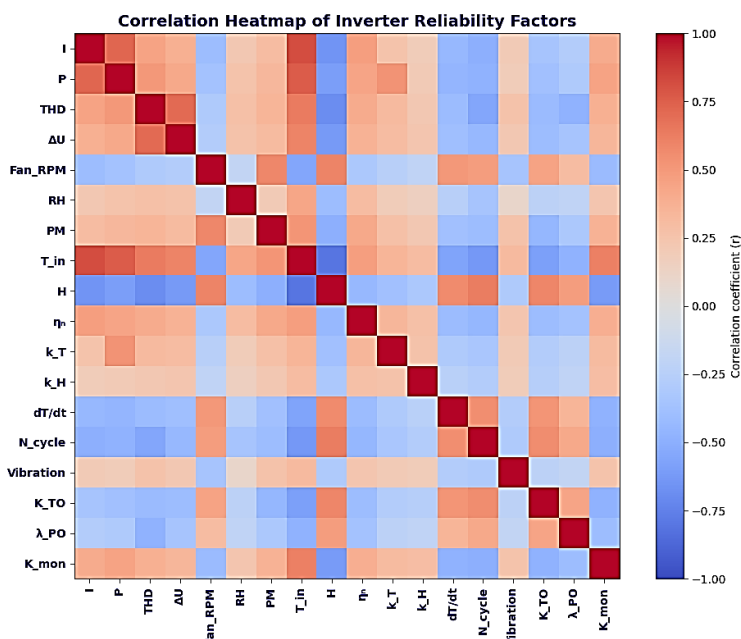
Инверторнинг эксплуатацион параметрлари ўртасидаги боғлиқликни баҳолаш учун Пирсон (r) корреляция коэффиценти орқали чизиқли муносабатлар, Спирман (p) корреляция коэффиценти орқали эса монотон боғлиқликлар таҳлил қилинди (2-жадвал).

2-жадвал. Инвертор ишончилигига таъсир этувчи параметрлар ўртасидаги корреляцион таҳлил натижалари

Table 2. Results of Correlation Analysis Between Parameters Affecting Inverter Reliability

№	Параметрлар жуфтлиги	r	p	№	Параметрлар жуфтлиги	r	p
1	$I - T_{in}$	0,82	0,79	11	$\eta_n - T_{in}$	0,47	0,45
2	$P - T_{in}$	0,76	0,73	12	η_n – ишончлилик индекси	-0,44	-0,41
3	$THD - T_{in}$	0,64	0,61	13	$k_T - P_{eff}$	0,53	0,50
4	$\Delta U - THD$	0,71	0,68	14	$k_H - \Delta T$	0,38	0,36
5	$Fan_{RPM} - \Delta T$	-0,74	-0,7	15	dT/dt – ишончлилик индекси	-0,57	-0,54
6	$RH - \Delta T$	0,43	0,46	16	N_{cycle} – ишончлилик индекси	-0,63	-0,60
7	$PM - Fan_{RPM}$	0,58	0,55	17	$Vibration - Fan_{RPM}$	-0,35	-0,33
8	T_{in} – ишончлилик индекси	-0,81	-0,78	18	$K_{TO} - \lambda$	-0,59	-0,56
9	THD – ишончлилик индекси	-0,69	-0,66	19	λ_{PO} – ишончлилик индекси	-0,48	-0,46
10	ΔU – ишончлилик индекси	-0,62	-0,59	20	K_{mon} – ишончлилик индекси	0,61	0,58

2-жадвалда келтирилган натижалардан келиб чиққан ҳолда асосий таъсир этувчи омилларни осон ажратиш мақсадида иссиқлик харитаси ишлаб 2-расмда чиқилди.



2–расм. Марказлашган инверторларнинг узок муддатли ишлаш ишончилигига таъсир этувчи асосий омиллар ўртасидаги корреляцион иссиқлик харитаси

Figure 2. Correlation Heat Map of Key Factors Affecting the Long-Term Reliability of Centralized Inverters

3-жадвал. Марказлашган инверторлар ишончилигига таъсир этувчи доминант омиллар

Table 3. Dominant Factors Affecting the Reliability of Centralized Inverters

№	Омил	Таснифи	Ишончилик индекси (Н) билан боғлиқлик	Таҳлил натижаси
1	Ички ҳарорат (T_{in})	Термик	$r = -0,81$	Асосий деградация драйвери
2	Гармоник бузилиш (THD)	Электр	$r = -0,69$	IGBT ва DC-конденсаторларга хавф
3	Ҳарорат цикллари сони (N_{cycle})	Термик	$r = -0,63$	Термик таъсирни кучайтиради
4	Кучланиш оғиши (ΔU)	Электр	$r = -0,62$	Тармоқ сифати пастлашиши
5	Ҳарорат ўзгариш тезлиги (dT/dt)	Термик	$r = -0,57$	Иссиқлик хавфи
6	Совитиш тизими ҳолати (Fan_{RPM})	Эксплуатацион	$r = -0,74$ (ΔT билан)	Термик барқарорлик калити
7	Юкланиш коэффициентини (η_n)	Электр	$r = -0,44$	Ортиқча юк деградацияни тезлаштиради
8	Техник хизмат сифати (K_{TO})	Эксплуатацион	$r = -0,59$ (λ билан)	Носозликлар интенсивлигини камайтиради

Ишончилик индекси (Н) билан ички ҳарорат ($r = -0,81$), ҳарорат цикллари сони (N_{cycle} , $r = -0,63$), ҳарорат ўзгариш тезлиги (dT/dt , $r = -0,57$) ва THD ($r = -0,69$) ўртасида кучли тескари таъсирга эга корреляция аниқланди. Бу ҳолат термик ва гармоник таъс инвертор хизмат муддатини қисқартирувчи асосий физик механизмлар эканини илмий жиҳатдан асослайди. Шу билан бирга, кучланиш оғишлари (ΔU) ҳам ишончилик индексига салбий таъсир кўрсатиб ($r = -0,62$), тармоқ сифати инвертор ишончилигида муҳим омил эканини кўрсатди.

Эксплуатацион омиллар орасида совитиш тизими самарадорлиги (Fan_{RPM}) алоҳида аҳамиятга эга бўлиб, у ҳарорат фарқи билан кучли тескари боғлиқликка эга ($r = -0,74$). Бу эса самарали совитиш термик барқарорликни таъминлаш орқали деградация жараёнларини секинлаштиришини исботлайди. Шунингдек, техник хизмат кўрсатиш сифати (K_{TO}) ва мониторинг камрови (K_{mon}) ишончилик индекси билан тўғри корреляцияга эга бўлиб, рақамли мониторинг ва профилактик хизмат инвертор ишончилигини оширишда муҳим ташкилий омиллар эканини кўрсатади.

Доминант омиллар сифатида ўрта ($r > 0,33$) ҳамда юқори ($r > 0,33$) таъсир этувчи омиллар танлаб олинди ва натижалар 3-жадвалга келтирилди.



4. Хулоса (Conclusions)

Олиб борилган корреляцион таҳлил натижалари марказлашган инверторларнинг узок муддатли ишончилиги, биринчи навбатда, термик ва электр табиатли омиллар билан белгиланишини кўрсатди. Айниқса, ички ҳарорат (T_{in}) ишончилик индекси билан кучли тесқари боғлиқликка эга бўлиб ($r = -0,81$), инвертор деградациясининг марказий омили сифатида намоён бўлади. Юклама ортиши, гармоник бузилишлар ва кучланиш оғишлари иссиқлик таъсирини кучайтириб, IGBT модуллари ҳамда DC-конденсаторларнинг хизмат муддатини қисқартиради. Термик таъсир ҳарорат цикллари сони ва ҳарорат ўзгариш тезлиги орқали намоён бўлиб, уларнинг ишончилилик индексига салбий таъсири деградация жараёнининг физик моҳиятини тасдиқлайди. Шу билан бирга, совитиш тизими самарадорлиги (Fan_{RPM}) ҳарорат фарқини чеклаш орқали ишончилиликни сақлашда ҳал қилувчи роль ўйнайди. Эксплуатацион нуқтаи назардан, техник хизмат кўрсатиш сифати ва мониторинг қамровининг юқори бўлиши носозликлар интенсивлигини камайтиради ва инверторнинг қолдиқ хизмат муддатини узайтиради. Умуман, доминант омиллар иерархияси инвертор ишончилигини оширишда термик назорат, тармоқ сифати, рақамли мониторинг интеграцияси зарур эканлигини кўрсатади.

АДАБИЁТ

1. Guerrero, J.M., Vasquez, J.C., Matas, J., de Vicuña, L.G., Castilla, M. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids – A general approach toward standardization // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2011. – Vol. 58. – № 1. – P. 158–172. DOI: 10.1109/TIE.2010.2066534.
2. Nema, P., Nema, R.K., Agnihotri, G. Inverter topologies and control structures for grid connected photovoltaic systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2010. – Vol. 25. – P. 322–333. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.026> (date of access 10.10.2025).
3. Chouder, A., Silvestre, S., Taghezouit, B., Karatepe, E. Monitoring, modeling and simulation of PV systems using LabVIEW // Solar Energy. – 2012. – Vol. 91. – P. 337–349. DOI: 10.1016/j.solener.2012.09.007.
4. Yang, S., Bryant, A., Mawby, P., Xiang, D., Ran, L., Tavner, P. An industry-based survey of reliability in power electronic converters // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2011. – Vol. 47. – № 3. – P. 1441–1451. DOI: 10.1109/TIA.2011.2124436.
5. Dhople, S.V., Davoudi, A., Dominguez-García, A.D. A framework for modeling and analysis of small-signal dynamics of photovoltaic inverters // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2012. – Vol. 28. – № 11. – P. 5022–5030. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2221133.
6. Kumar, A., Singh, A., Bansal, R.C. A review of fault diagnosis techniques for solar photovoltaic systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2020. – Vol. 104. – P. 389–405. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.023> (date of access 10.10.2025).
7. Benkercha, R., Moulahoum, S. Fault detection and diagnosis for photovoltaic systems: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 91. – P. 1–17. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.062.
8. Eltawil, M.A., Zhao, Z. Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems – A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2010. – Vol. 14. – № 1. – P. 112–129. DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.015.
9. Vazquez, S., Lukic, S., Galvan, E., Franquelo, L.G., Carrasco, J.M. Energy storage systems for transport and grid applications // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2010. – Vol. 57. – № 12. – P. 3881–3895. DOI: 10.1109/TIE.2010.2076414.
10. Rakhmonov I.U., Reymov K.M. Regularities of change of energy indicators of the basic technological equipment of the cotton cleaning industry // Journal of Physics: Conference Series. APITECH-2019. – 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055038.
11. Taslimov A.D., Rakhmonov I.U. Optimization of complex parameters of urban distribution electric networks // Journal of Physics: Conference Series. APITECH-2019. – 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055046.
12. Shmukler V., Babaev V., Kovalenko L., Kalmykov O., Demianenko I. Метод интегральных градиентов для поиска глобального экстремума функций многих переменных (совершенствование процедуры) // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2023. – Т. 807. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-46874-2_7 (дата обращения: 15.09.2023).



REFERENCES

1. Guerrero, J.M., Vasquez, J.C., Matas, J., de Vicuña, L.G., Castilla, M. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids – A general approach toward standardization // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2011. – Vol. 58. – № 1. – P. 158–172. DOI: 10.1109/TIE.2010.2066534.
2. Nema, P., Nema, R.K., Agnihotri, G. Inverter topologies and control structures for grid connected photovoltaic systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2010. – Vol. 25. – P. 322–333. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.026> (date of access 10.10.2025).
3. Chouder, A., Silvestre, S., Taghezouit, B., Karatepe, E. Monitoring, modeling and simulation of PV systems using LabVIEW // *Solar Energy*. – 2012. – Vol. 91. – P. 337–349. DOI: 10.1016/j.solener.2012.09.007.
4. Yang, S., Bryant, A., Mawby, P., Xiang, D., Ran, L., Tavner, P. An industry-based survey of reliability in power electronic converters // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2011. – Vol. 47. – № 3. – P. 1441–1451. DOI: 10.1109/TIA.2011.2124436.
5. Dhople, S.V., Davoudi, A., Domínguez-García, A.D. A framework for modeling and analysis of small-signal dynamics of photovoltaic inverters // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2012. – Vol. 28. – № 11. – P. 5022–5030. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2221133.
6. Kumar, A., Singh, A., Bansal, R.C. A review of fault diagnosis techniques for solar photovoltaic systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2020. – Vol. 104. – P. 389–405. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.023> (date of access 10.10.2025).
7. Benkercha, R., Moulahoum, S. Fault detection and diagnosis for photovoltaic systems: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – Vol. 91. – P. 1–17. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.062.
8. Eltawil, M.A., Zhao, Z. Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems – A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2010. – Vol. 14. – № 1. – P. 112–129. DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.015.
9. Vazquez, S., Lukic, S., Galvan, E., Franquelo, L.G., Carrasco, J.M. Energy storage systems for transport and grid applications // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2010. – Vol. 57. – № 12. – P. 3881–3895. DOI: 10.1109/TIE.2010.2076414.
10. Rakhmonov I.U., Reymov K.M. Regularities of change of energy indicators of the basic technological equipment of the cotton cleaning industry // *Journal of Physics: Conference Series. APITECH-2019*. – 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055038.
11. Taslimov A.D., Rakhmonov I.U. Optimization of complex parameters of urban distribution electric networks // *Journal of Physics: Conference Series. APITECH-2019*. – 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055046.
12. Method of integral gradients for searching global extremum of multivariable functions (procedure improvement) / V. Shmukler, V. Babaev, L. Kovalenko, O. Kalmykov, I. Demianenko // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2023. – Vol. 807. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-46874-2_7 (date of access 15.09.2023).