



Марказлашган инверторларнинг ҳолатини реал вақт режимида мониторинг қилиш учун тармоқ архитектурасини ишлаб чиқиш

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, доц. 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 станцияларида марказлашган инверторлар асосий энерготехнологик бўғин ҳисобланади. Улар иш режимида юклама ўзгариши, ташқи муҳит таъсири, иссиқлик зўриқишлари ва қувват электроника элементларининг қариши сабабли тез-тез оғишлар ва носозликларга учрайди. Шу боис марказлашган инверторларнинг электр, иссиқлик ва эксплуатацион ҳолатини реал вақт режимида комплекс мониторинг қилиш, маълумот сифатини назорат қилиш (DQ), хавф индикаторларини аниқлаш (Ft, Fu, Fi) ва ишончлилик индекси (HI) асосида ҳолатни таснифлаш муҳим илмий-амалий аҳамиятга эга. Бундай ёндашув инвертор ишончилигини ошириш, аварияларни олдиндан аниқлаш, техник хизмат кўрсатишни оптималлаштириш ва эксплуатацион қарорларни тезкор қабул қилиш имконини беради.

Мақсад: марказлашган инверторларнинг электр, иссиқлик ва эксплуатацион параметрларини реал вақт режимида йиғиш ва қайта ишлашга асосланган тармоқ архитектурасини ишлаб чиқиш; маълумот сифатини баҳолаш, хавф ҳолатларини (WARNING/CRITICAL) аниқлаш ҳамда ишончлилик индекси HI(t) бўйича инвертор ҳолатини “Green/Warn/Red” шаклида классификация қиладиган мониторинг-диагностика алгоритмларини шакллантиришдан иборат.

Усуллар: тадқиқотда марказлашган инвертор ҳолатини баҳолаш учун қуйидаги усуллар қўлланилди: инвертордан олинадиган асосий электр, иссиқлик ва эксплуатацион параметрлар (U_{dc} , I_{dc} , U_{ac} , I_{ac} , P , Q , $\cos\varphi$, f , T_{hs} , T_{igt} , RPM, Fault) асосида параметрлар вектори $x(t)$ шакллантирилди. Олинган маълумотлар вақт синхронизацияси, диапазон мувофиқлиги ва аномалияларни аниқлаш орқали сифат назоратидан ўтказилди.

Натижалар: тақдим этилган ёндашув натижасида марказлашган инверторларни реал вақт режимида мониторинг қилиш учун: структура, мантикий схема ва алгоритм ишлаб чиқилди; маълумот сифатини назорат қилиш ва тиклаш (filter/recovery) блоки киритилиб, ишончсиз маълумотлардан келиб чиқадиган нотўғри қарорларни камайтириш таъминланди; электр ва иссиқлик параметрлари асосида хавф ҳолатлари олдиндан аниқланиб, “WARNING/CRITICAL” режимга автоматик ўтиш логикаси шакллантирилди; HI(t) асосида рангли классификация (Green/Warn/Red) ва автоматик хабарномалар тизими ишлаш принципи асослаб берилди; лаборатория шароитида TEX 6.2KBGN инвертори танланиб, турли режимларда параметр динамикаси кузатилди ва мониторинг учун ахборотли кўрсаткичлар тўплами шакллантиришга замин яратилди.

Калит сўзлар: марказлашган инвертор, реал вақт мониторинги, диагностика, маълумот сифати (DQ), хавф индикаторлари, ишончлилик индекси (HI), термик режим, кучланиш оғиши, ток чекловлари, SCADA/IoT, Raspberry Pi 5, Modbus (RS232/RS485), филтрлаш, нормаллаштириш, предиктив баҳолаш, LSTM, деградация модели, Green/Warn/Red классификация.

Разработка сетевой архитектуры для мониторинга состояния централизованных инверторов в режиме реального времени

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, Ташкентский государственный технический университет, 100095, Uzbekistan; nomon.niyozov_2422@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-1031-3460>

Актуальность: на электростанциях с возобновляемыми источниками энергии централизованные инверторы являются основным энерготехнологическим звеном. В процессе эксплуатации они часто подвергаются перегрузкам и отказам вследствие изменения нагрузки, воздействия внешней среды, тепловых нагрузок и старения элементов силовой электроники. В связи с этим комплексный мониторинг электрического, теплового и эксплуатационного состояния централизованных инверторов в режиме реального времени, контроль качества данных (DQ), выявление индикаторов опасности (Ft, Fu, Fi) и классификация состояния на основе индекса надёжности (HI) имеют важное научно-практическое значение. Такой подход позволяет повысить надёжность инверторов, заблаговременно выявлять

For citation: I.U. Rakhmonov, N.N. Niyozov. Development of a Network Architecture for Real-Time Monitoring of the Condition of Centralized Inverters. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 1, pp. 21-31.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19703634>

Received: 15.09.2025

Revised: 14.10.2025

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/>).

аварийные ситуации, оптимизировать техническое обслуживание и оперативно принимать эксплуатационные решения.

Цель: разработка сетевой архитектуры, основанной на сборе и обработке электрических, тепловых и эксплуатационных параметров централизованных инверторов в режиме реального времени; формирование алгоритмов мониторинга и диагностики, обеспечивающих оценку качества данных, выявление аварийных состояний (WARNING/CRITICAL) и классификацию состояния инвертора в формате «Green/Warn/Red» на основе индекса надёжности HI(t).

Методы: в данном исследовании для оценки состояния централизованных инверторов был применен экспериментальный приём: на основе основных электрических, тепловых и эксплуатационных параметров инвертора (U_{dc} , I_{dc} , U_{ac} , I_{ac} , P , Q , $\cos\phi$, f , θ_{ts} , T_{igt} , RPM, Fault), был сформирован вектор параметров $x(t)$. Полученные данные прошли контроль качества с использованием синхронизации по времени, проверку диапазонов, выявление возможных аномалий.

Результаты: В результате предложенного подхода были разработаны структура, логическая схема и алгоритм для мониторинга централизованных инверторов в режиме реального времени. Внедрен блок контроля и восстановления качества данных (фильтрация/восстановление), что позволило снизить количество ошибочных решений, вызванных недостоверной информацией. На основе электрических и тепловых параметров были предварительно определены опасные ситуации и сформирована логика автоматического перехода в режим "ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ/КРИТИЧЕСКИЙ". Обоснован принцип работы цветовой классификации (зеленый/предупреждение/красный) на основе HI(t) и системы автоматических уведомлений. В лабораторных условиях был выбран инвертор TEX 6.2KBGN, изучена динамика параметров в различных режимах, что создало основу для формирования информативного набора показателей для мониторинга.

Ключевые слова: централизованный инвертор, мониторинг в реальном времени, диагностика, качество данных (DQ), индикаторы опасности, индекс надёжности (HI), тепловой режим, отклонение напряжения, ограничения тока, SCADA/IoT, Raspberry Pi 5, Modbus (RS232/RS485), фильтрация, нормализация, предиктивная оценка, LSTM, модель деградации, классификация Green/Warn/Red.

Development of a Network Architecture for Real-Time Monitoring of the Condition 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>

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

Relevance: in power plants based on renewable energy sources, centralized inverters represent a key energy-technological component. During operation, they are frequently exposed to deviations and failures due to load variations, environmental influences, thermal stresses, and aging of power electronic components. Therefore, comprehensive real-time monitoring of the electrical, thermal, and operational condition of centralized inverters, control of data quality (DQ), identification of risk indicators (F_T , F_U , F_I), and state classification based on the reliability index (HI) are of significant scientific and practical importance. This approach enables improvement of inverter reliability, early detection of emergency conditions, optimization of maintenance activities, and prompt operational decision-making.

Aim: to develop a network architecture based on real-time acquisition and processing of electrical, thermal, and operational parameters of centralized inverters; to design monitoring and diagnostic algorithms that provide data quality assessment, detection of critical conditions (WARNING/CRITICAL), and classification of inverter states in the “Green/Warn/Red” format based on the reliability index HI(t).

Methods: in this study, the condition of centralized inverters was evaluated using the following methods: a parameter vector $x(t)$ was formed based on the main electrical, thermal, and operational parameters obtained from the inverter (U_{dc} , I_{dc} , U_{ac} , I_{ac} , P , Q , $\cos\phi$, f , θ_{ts} , T_{igt} , RPM, Fault). The collected data were subjected to quality control through time synchronization, range validation, and anomaly detection.

Results: as a result of the proposed approach, a structural model, logical scheme and algorithm for real-time monitoring of centralized inverters were developed. A data quality control and recovery (filter/recovery) module was implemented, reducing erroneous decisions caused by unreliable data. Based on the analysis of electrical and thermal parameters, early detection of hazardous conditions was achieved, and an automatic transition logic to the “WARNING/CRITICAL” mode was established. The principle of color-based classification (Green/Warn/Red) and automatic notification based on the HI(t) index was substantiated. Under laboratory conditions, the TEX 6.2KBGN inverter was selected, parameter dynamics were investigated under various operating modes, and an informative set of indicators for monitoring was formed.

Keywords: centralized inverter, real-time monitoring, diagnostics, data quality (DQ), risk indicators, reliability index (HI), thermal regime, voltage deviation, current limits, SCADA/IoT, Raspberry Pi 5, Modbus (RS232/RS485), filtering, normalization, predictive assessment, LSTM, degradation model, Green/Warn/Red classification.

1. Кириш (Introduction)

Қайта тикланувчи энергия манбаларига асосланган электр станцияларида марказлашган инверторлар асосий энерготехнологик бўғин ҳисобланиб, уларнинг барқарор ва ишончли ишлаши бутун энергетик тизим самарадорлигига бевосита таъсир кўрсатади. Шунинг учун марказлашган инверторларни доимий равишда реал вақт режимида мониторинг қилиш учун тармоқ архитектурасини тўғри ва аниқ шакллантириш муҳим ҳисобланади. Ушбу архитектурани тўғри шакллантириш ҳар бир поғонада маълумотларнинг ишончли ва тўлиқ шаклланишига, шу асосда тўғри ва самарали қарорлар қабул қилинишига хизмат қилади [1-3].

Таклиф этилаётган тармоқ архитектураси марказлашган инверторни назорат объекти сифатида қараб, унинг электр, иссиқлик ва эксплуатацион ҳолатини комплекс равишда баҳолашга йўналтирилган. Инвертордан олинadиган асосий электр параметрлари, жумладан кучланиш, ток, актив ва реактив қувват, қувват коэффициентлари ҳамда частота реал вақт режимида шакллантирилади. Шу билан бирга, қувват электроника элементларининг ҳарорати ва совитиш тизими ҳолатига оид маълумотлар йиғилиб, инверторнинг техник ҳолатини чуқур таҳлил қилиш имкони яратилади.

Архитектуранинг муҳим жиҳати шундаки, у фақатгина жорий иш режими мониторинги билан чекланиб қолмасдан, реал вақт диагностикаси орқали инверторнинг соғломлик даражасини баҳолаш имконини ҳам таъминлайди. Электр ва иссиқлик параметрлари ўртасидаги ўзаро боғлиқликни таҳлил қилиш асосида ишончликка салбий таъсир этувчи омиллар олдиндан аниқлашга хизмат қилади [4,5].

Шунингдек, ушбу архитектура предиктив баҳолаш тамойилларига асосланиб, марказлашган инверторларнинг хизмат муддатини прогноз қилиш ҳамда техник хизмат кўрсатиш жараёнларининг самарадорлигини ошириш имконини беради [6,7,8].

2. Материал ва усуллар (Materials and Methods)

Марказлашган инверторларнинг ҳолатини реал вақт режимида мониторинг қилиш 1-расмда келтирилган структурага асосан амалга оширилади.



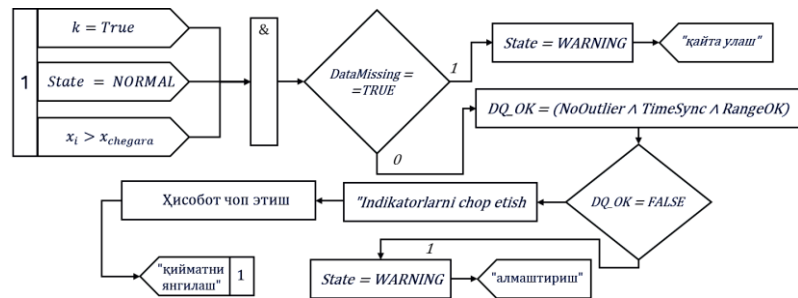
1-расм. Марказлашган инверторларнинг ҳолатини реал вақт режимида мониторинг қилиш структураси

Figure 1. Structure of Real-Time Monitoring of the Condition of Centralized Inverters

Дастлаб объектни идентификация қилиш ва режимни белгилаш, яъни марказлашган инверторнинг иш режими (юклама ҳолати, юкланганлик даражаси, иш муҳити) аниқланади [9]. Кейин кузатиладиган индикаторлар тизими шакллантирилиб, электр, иссиқлик ва эксплуатацион параметрлар танлаб олинади. Ушбу индикаторлар асосида ўлчаш маълумотлари йиғилади ва маълумотлар сифати назорат қилиниб, шовқин ва тасодифий оғишлардан тозаланади ҳамда нормаллаштирилади. Қайта ишланган параметрлардан ишончлик индекси ҳисобланиб, инвертор ҳолати классификация қилинади ва эксплуатацион қарорлар қабул қилинади. Ушбу жараён қуйидаги ифода билан ифодланади:

$$HI(t) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot f_i \quad (1)$$

бу ерда $x_i(t)$ - реал вақтда ўлчанган индикаторлар, $x_{i,ref}$ — эталон қийматлар, w_i - уларнинг таъсир (вазн) коэффициентлари. Натижада ҳисоботлар шакллантирилиб, марказлашган инвертор ишончилигини оширишга қаратилган бошқарув қарорлари қабул қилинади.



2-расм. Марказлашган инверторларнинг ҳолатини реал вақт режимида мониторинг қилиш мантиқий схемаси

Figure 2. Logical Scheme for Real-Time Monitoring of the Condition of Centralized Inverters

Марказлашган инверторларнинг ҳолатини реал вақт режимида мониторинг қилиш учун тармоқ структурасига асосан 2-расмда келтирилган марказлашган инверторларнинг ҳолатини реал вақт режимида мониторинг қилиш мантиқий схемаси ишлаб чиқилди. Унга асосан маълумотлар узлуксиз қабул қилиниб, аввало уларнинг ишончилиги ва сифат кўрсаткичлари баҳоланади. Бунда маълумот сифати мезони DQ қуйидагича аниқланади [10,11,12]:

$$DQ(t) = 1\{RangeOK\} \cdot 1\{TimeSync\} \cdot 1\{NoOutlier\}; \quad (2)$$

агар $DQ(t) = 0$ бўлса, филтрлаш ва қайта тиклаш амаллари бажарилиб, белгиланган вақтда тикланмаса тизим “WARNING/CRITICAL” ҳолатига ўтади. Шу билан бирга электр ва термик параметрлар асосида хавф индикаторлари шакллантирилади:

$$F_T = (T > T_{лим}) \vee \left(\frac{dT}{dt} > r_T \right); \quad (3)$$

$$F_U = (U < U_{мин}) \vee (U > U_{макс}); \quad (4)$$

$$F_I = (I > I_{макс}). \quad (5)$$

Шундан сўнг комплекс қарор қабул қилиш логикаси қўлланилади:

$$RIT = F_{fault} \vee (F_T \wedge F_F) \vee (F_U \wedge F_I); \quad (6)$$

$$WARN = (F_T \vee F_U \vee F_I \vee F_H \vee F_F) \wedge \neg CRIT. \quad (7)$$

Шундан сўнг ишончилиқ индекси ҳисобланиб, инвертор ҳолати ранг асосида классификация қилинади:

$$HI(t) = \sum_{i=1}^n w_i f_i \left(\frac{x_i(t) - x_{i,ref}}{x_{i,ref}} \right). \quad (8)$$

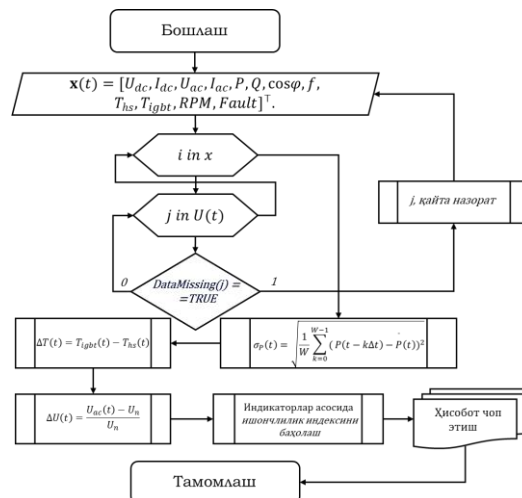
Green/Warn/Red агар $HI \leq \theta_1$, $\theta_1 < HI \leq \theta_2$, $HI > \theta_2$.

Натижалар доимий равишда қайд этиб борилади ва ҳолат ўзгарса автоматик хабарномалар шакллантирилади.

Дастлаб инвертордан олинadиган параметрлар вектори шакллантирилади:

$$\mathbf{x}(t) = [U_{dc}, I_{dc}, U_{ac}, I_{ac}, P, Q, \cos \varphi, f, T_{hs}, T_{igbt}, RPM, Fault]^T.$$

3. Натижа ва муҳокама (Result and discussion)



3-расм. Марказлашган инверторларнинг ҳолатини реал вақт режимида мониторинг қилиш алгоритми

Figure 3. Algorithm for Real-Time Monitoring of the Condition of Centralized Inverters

Юқоридагилар эътиборга олинган ҳолда 3-расмда марказлашган инверторларнинг ҳолатини реал вақт режимида мониторинг қилиш алгоритми ишлаб чиқилган бўлиб, унга асосан ҳар бир параметр бўйича маълумот мавжудлиги текширилиб, агар DataMissing=TRUE бўлса, қайта назорат циклига ўтилади. Кейин диагностик белгилар ҳисобланади, жумладан термик фарк:

$$\Delta T(t) = T_{igbt}(t) - T_{hs}(t); \quad (9)$$

юклама ўзгарувчанлиги эса ойнавий дисперсия орқали аниқланади:

$$\sigma_p(t) = \sqrt{\frac{1}{W} \sum_{k=0}^{W-1} (P(t - k\Delta t) - \bar{P}(t))^2}. \quad (10)$$

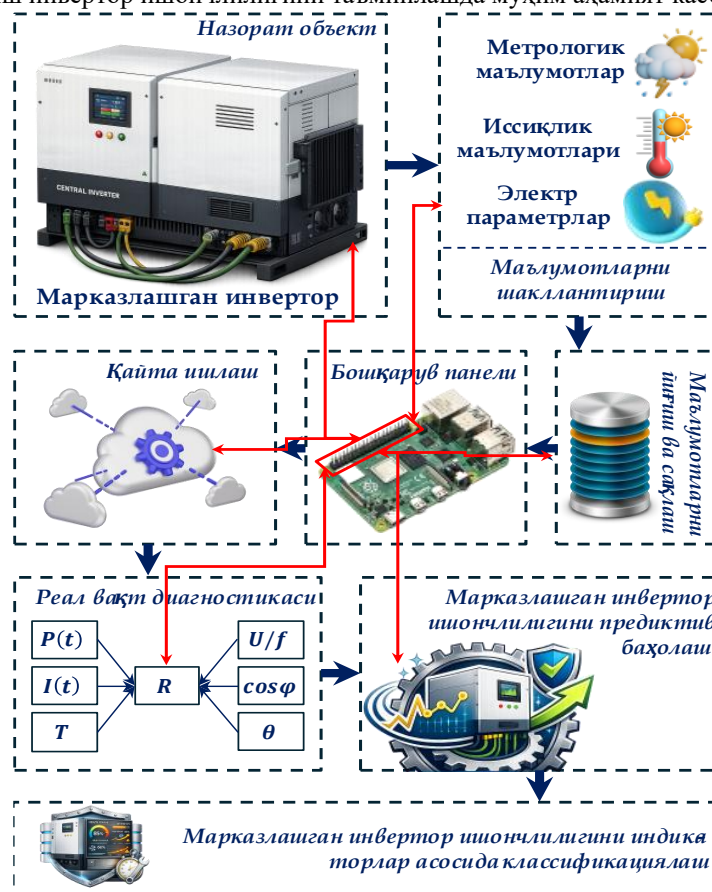
Шунингдек, кучланиш оғиши куйидагича баҳоланади:

$$\Delta U(t) = \frac{U_{ac}(t) - U_n}{U_n}. \quad (11)$$

Ҳисобланган индикаторлар асосида ишонччилик индекси аниқланади ва инвертор ҳолати таснифланади. Алгоритм якунида натижалар қайд этилиб, ҳисоботлар шакллантирилади. Ушбу ёндашув мониторингни ҳисоблаш жиҳатдан самарали ва амалий қўллаш имкониятини беради.

Марказлашган инверторларнинг ҳолатини реал вақт режимида мониторинг қилиш структураси, мантиқий схемаси ҳамда алгоритмларини умумийлаштирган ҳолда унинг тармок архитектураси ишлаб чиқилган бўлиб, у куйидаги 8 қисмдан ташкил топган.

1. Назорат объекти бу марказлашган инвертор ҳисобланиб, унинг назорат қилинадиган кесимлари 4-расмда ажратиб кўрсатилган. Ушбу инвертор электр энергиясини ўзгартириш жараёнида юклама ва ташқи муҳит таъсирида турли электр, иссиқлик ва эксплуатацион зўриқишларга дуч келади. Шу сабабли унинг асосий таркибий қисмларини реал вақт режимида мониторинг қилиш инвертор ишонччилигини таъминлашда муҳим аҳамият касб этади.

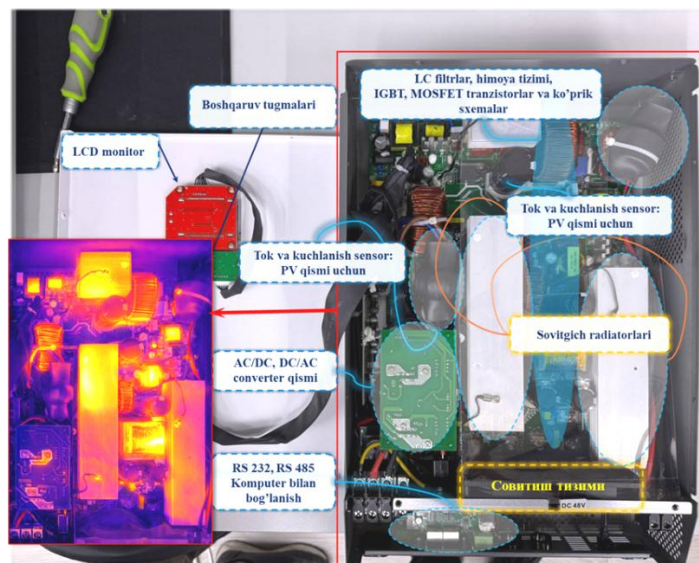


4-расм. Марказлашган инверторларнинг ҳолатини реал вақт режимида мониторинг қилиш алгоритми

Figure 4. Algorithm for Real-Time Monitoring of the Condition of Centralized Inverters

Лаборатория шароитида марказлашган инверторларнинг ишонччилиги ва реал вақт режимидаги мониторинг алгоритмларини синовдан ўтказиш, шунингдек дастлабки экспериментал маълумотларни йиғиш ва параметрлар динамикасини таҳлил қилиш мақсадида TEX 6.2KBGN модели инвертор танланди. Инвертор махсус лаборатория стендида турли иш

режимларида, жумладан DC кириш, AC чиқиш ва фотоэлектр (PV) режимларида эксплуатация қилинди.



5-расм. Инверторнинг назорат қисмлари
Figure 5. Monitoring Components of the Inverter

Тадқиқот давомида ток–кучланиш характеристикалари, юклама ўзгаришларининг таъсири, зарядлаш жараёнларининг кечиши ҳамда ҳимоя тизимларининг ишга тушиш ҳолатлари кузатилди. Олинган дастлабки натижалар инвертор параметрларининг вақт бўйича ўзгариш қонуниятларини аниқлаш, реал вақт мониторинги учун ахборотли кўрсаткичларни шакллантириш ва кейинги босқичларда ишончилиқни баҳолаш ҳамда прогнозлаш алгоритмларини такомиллаштириш учун асос бўлади.

1-жадвал. TEX 6.2KBGN инверторининг техник, юклама ва эксплуатацион параметрлари
Table 1. Technical, Load, and Operational Parameters of the TEX 6.2KBGN Inverter

Асосий техник параметрлари					
№	Параметр	Қиймат	№	Параметр	Қиймат
1	Модель	TEX 6.2KBGN	9	АС чиқиш	230 VAC, 50/60 Hz, 27 A
2	Номинал қувват	6200 VA / 6200 W	10	Қуёш панел қуввати	7500 W
3	PV/DC–АС қуввати	6500 W	11	Макс. зарядлаш тўқи	120 A
4	DC кириш	48 VDC, 143.5 A	12	PV макс. кириш тўқи	27 A
5	АС кириш	230 VAC, 50/60 Hz	13	Қуёш Vmp диапазони	60–500 VDC
6	АС зарядлагич	54 VDC, 100 A	14	Энг мақбул Vmp	300–400 VDC
7	Фаза сони	1-фаза	15	Макс. PV кучланиш	500 VDC
8	Иш ҳарорати	-10...50 °C	16	Ҳимоя даражаси	IP21
Юклама ва эксплуатацион параметрлар					
9	Тўлиқ юклама қуввати	6200 W	20	Иккинчи юклама узилиши	44 VDC
10	Асосий юклама	6200 W	21	Иккинчи юклама қайтиши	52 VDC
11	Иккинчи юклама	6200 W	22	Серия рақами	20241127 0320

5-расмда биринчи навбатда назорат ва ўлчаш платаси ажратиб кўрсатилган бўлиб, у ток ва кучланиш сенсорларидан келаётган сигналларни қабул қилиш, рақамлаштириш ва бошқарув алгоритмларига узатиш вазифасини бажаради. Мазкур плата инверторнинг барча диагностик маълумотлари учун асосий манба ҳисобланади.

Шунингдек, қувват электроника қисми, яъни IGBT модуллари ва диодлар жойлашган радиатор блоки алоҳида белгиланган. Бу зонада юкори ток ва кучланиш таъсирида катта иссиқлик ажралиб чиқади, шу боис ушбу қисмда ҳароратни узлуксиз назорат қилиш талаб этилади.

Чизмада DC шина ва филтрлаш конденсаторлари ҳам кўрсатилган бўлиб, улардаги ток ва кучланиш ўзгаришлари инвертор қаришига тўғридан-тўғри таъсир кўрсатади. Бундан ташқари,



совитиш тизими, яъни вентиляторлар ва ҳаво кириш-чиқиш каналлари белгиланган. Совитиш самарадорлигининг пасайиши қувват элементларининг тез қизиби кетишига олиб келади. Шу сабабли вентилятор тезлиги ва радиатор ҳарорати ишончилиликни баҳолашда асосий кўрсаткичлардан бири ҳисобланади.

2. Маълумотларни шакллантириш босқичи марказлашган инвертор ҳолатини реал вақт режимида баҳолаш жараёнининг асосий қисми ҳисобланади. Ушбу босқичда инверторнинг ички ўлчаш занжирлари ва сенсорлари орқали электр, иссиқлик ҳамда эксплуатацион параметрлар узлуксиз равишда аниқланади. Хусусан, DC кириш томонида кучланиш ва ток қийматлари, AC чиқишда эса кучланиш, ток, актив ва реактив қувват, қувват коэффициенти ҳамда частота параметрлари шакллантирилади.

Шу билан бирга, қувват электроника элементларининг ҳарорати, радиаторлар ва совитиш тизими ҳолатига оид маълумотлар махсус ҳарорат сенсорлари ёрдамида йиғилади. Вентилятор тезлиги ва ҳаво оқими параметрлари ҳам инверторнинг термик режимини баҳолашда муҳим ҳисобланади.

Барча ўлчаш сигналлари назорат ва ўлчаш платасига узатилиб, рақамлаштирилади ҳамда кейинги қайта ишлаш ва диагностика босқичлари учун тайёр ҳолатга келтирилади.

3. Бошқарув панели сифатида Raspberry Pi 5 асосидаги ҳисоблаш модули қўлланилиб, у марказлашган инвертордан келиб тушаётган электр, иссиқлик ва эксплуатацион маълумотларни қабул қилиш, қайта ишлаш ҳамда узатиш вазифаларини бажаради. Raspberry Pi 5 ўлчаш модуллари ва алоқа интерфейслари орқали инвертор параметрларини реал вақт режимида йиғади ҳамда уларни структураланган ҳолатга келтиради. Шунингдек, ушбу панель маълумотларни вақтинча сақлаш, дастлабки диагностика алгоритмларини ишга тушириш ва юқори даражадаги таҳлил ҳамда предиктив баҳолаш модулларига узатишни таъминлайди.

4. Қайта ишлаш босқичида марказлашган инвертордан олинган реал вақт маълумотлари филтрланади, нормаллаштирилади ва диагностик кўрсаткичларга айлантирилади. Ушбу қисм стационар хотира ва оператив хотирала ўрнатилган алгоритмлар орқали амалга оширилади. Ўлчаш сигналларидаги шовқинни камайтириш учун рақамли пастчастотали филтр қўлланилади:

$$x_f(t) = \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t x(\lambda) d\lambda; \quad (12)$$

бу ерда $x(t)$ — ўлчанган параметр, τ — филтрлаш ойнаси.

Кейин электр ва иссиқлик параметрлари асосида инверторнинг комплекс ҳолат индекси ҳисобланади:

$$R(t) = w_1 \frac{P(t)}{P_n} + w_2 \frac{T_{\max} - T(t)}{T_{\max}} + w_3 \cos \varphi(t) + w_4 \frac{U(t)}{U_n}; \quad (13)$$

бу ерда $P(t)$ — актив қувват, $T(t)$ — ҳарорат, $U(t)$ — кучланиш, w_i — вазн коэффицентлари.

Шаклланган $R(t)$ индекси вақт бўйича таҳлил қилиниб, тренд ва оғишлар аниқланади. Ушбу қайта ишлаш усуллари инвертор ишончилигини баҳолаш ва предиктив диагностика учун асос бўлиб хизмат қилади.

5. Марказлашган инвертор ишончилигини предиктив баҳолаш бевосита стационар хотира ва оператив хотирага ўрнатилган алгоритмлар орқали амалга оширилиб, реал вақт режимида йиғилган электр, иссиқлик ва эксплуатацион параметрлар асосида шакллантирилади. Ушбу жараёнда статистик таҳлил, тренд экстраполяцияси ҳамда ҳолат индексига асосланган усуллар қўлланилади. Инверторнинг умумий ишончилилик функцияси қуйидаги комплекс ифода орқали баҳоланади:

$$\mathcal{R}(t) = \exp \left(- \int_0^t \left[\alpha_1 \left(\frac{T(\tau)}{T_{ref}} \right)^m + \alpha_2 \left(\frac{I(\tau)}{I_{ref}} \right)^n \right] d\tau \right); \quad (14)$$

бу ерда $T(\tau)$ — ҳарорат, $I(\tau)$ — ток, α_i — деградация коэффицентлари. Ҳисобланган ишончилилик қиймати асосида инвертор ҳолати синфланади ва хизмат кўрсатиш қарорлари қабул қилинади.

6. Реал вақт диагностикаси марказлашган инверторнинг жорий техник ҳолатини узлуксиз баҳолашга қаратилган бўлиб, электр, иссиқлик ва эксплуатацион параметрларнинг вақт бўйича ўзгаришини тезкор таҳлил қилишга асосланади. Ушбу босқичда кучланиш, ток, қувват, қувват коэффициенти ҳамда ҳарорат каби бир нечта асосий кўрсаткичлар белгиланган чегара қийматлар ва эталон режимлар билан солиштирилади. Нормал иш режимидаги оғишлар аниқланган тақдирда, тизим автоматик равишда огоҳлантириш ёки авария сигналларини шакллантиради. Бунда маълумотларни бошқарув панелига бевосита улаш орқали, бошқа бир маълумотларни эса тизимга интеграциялаш орқали амалга ошириш мумкин. Ушбу жараёнларнинг таҳлили 2-жадвалда келтирилган.



2-жадвал. Реал вақт диагностикасида маълумотларни алмашишни усули ва тезлиги

Table 2. Data Exchange Methods and Sampling Rates in Real-Time Diagnostics

№	Керакли параметр	Integ-ratsiya (I) yoki sensor orqali (S)	Қурилмадан олиш интерфейси	Модул	Модул билан ўқиш тезлиги	Қурилмадан (комм.) ўқиш тезлиги
1	U_{DC} (48V батарея DC)	(I)	RS232/RS485 (Modbus)	INA226 DC current/voltage sensor (I2C) + шина	10–100 Гц (амалда 10–20 Гц етарли)	0.5–2 с (\approx 0.5–2 Гц)
2	I_{DC} (батарея токи)	(I)	RS232/RS485	ACS758-200B Hall ток сенсори (аналог) + ADS1115 (I2C ADC)	50–500 сэмпл/с (фильтрлаб 10–50 Гц)	0.5–2 с
3	P_{DC}	(I)	RS232/RS485	Udc ва Idc дан хисобланади (INA226 ёки ACS758+ADS1115)	10–50 Гц	0.5–2 с
4	U_{AC} (230VAC)	(I)	RS232/RS485	ZMPT101B AC voltage sensor модуль + ADS1115	200–800 сэмпл/с (RMS 5–20 Гц)	1–5 с (\approx 0.2–1 Гц)
5	I_{AC} (AC ток)	(I)	RS232/RS485	SCT-013-000 (100A) CT + burden resistor + ADS1115	200–800 сэмпл/с (RMS 5–20 Гц)	1–5 с
6	$P, Q, \cos\phi, f$	(I)	RS232/RS485	Энг ишончлиси: PZEM-004T v3 (Modbus/TTL) ёки ADE7953 асосида метеринг плата (SPI)	PZEM: 1–2 с янгилашиш; ADE7953: 10–50 Гц ҳисобот	1–5 с
7	PV кириш $U (V_{mp})$	(I), (S)	RS232/RS485	Юқори DC учун: HV divider + изоляцияли ADC (амалий вариант: ADS1115 + изоляция блогли)	5–20 Гц (фильтр билан)	1–5 с
8	PV ток (I_{mp})	(S)	RS232/RS485	Hall DC сенсор: ACS758 (танланган диапазон) + ADS1115	10–50 Гц	1–5 с
9	IGBT/рад на-тор харорати	(I), (S)	RS232/RS485	DS18B20 (1-Wire) ёки MAX31855 + K-термопара (SPI)	DS18B20: 1 Гц; Термопара: 2–10 Гц	2–10 с
10	Вентилятор тезлиги (RPM)	(S)	RS232/RS485	4-wire fan бўлса: Tach signal'ни GPIO билан ўлчаш (пулс санаш)	1–5 Гц	2–10 с
11	Fault/Warning кодлар	(I), (S)	RS232/RS485	-	—	0.5–2 с
12	Батарея зарядлаш тўки (Charge current)	(I)	RS232/RS485	DC ток учун юқоридаги: INA226 ёки ACS758+ADS1115	10–50 Гц	0.5–2 с



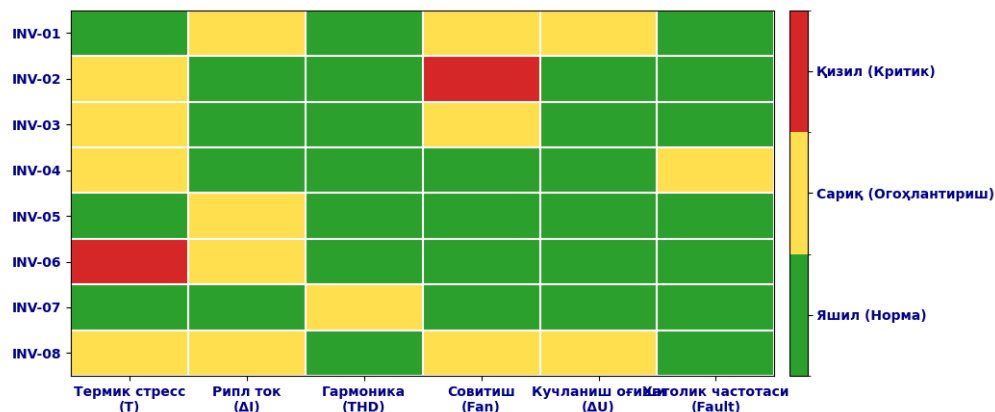
7. Марказлашган инвертор ишончилигини предиктив баҳолаш реал вақт диагностикаси орқали келган натижалардан келиб чиқиб инвертордаги потенциал носозликларни предиктив баҳолайди. Қуйида марказлашган инвертор ишончилигини LSTM + физик-деградация модели билан бирлаштирган гибрид предиктив баҳолаш усули бирта комплекс формула кўринишида берилди:

$$\hat{\mathcal{R}}(t + \Delta) = \exp \left(- \int_t^{t+\Delta} \left[\alpha_T \left(\frac{\hat{T}(\tau)}{T_{ref}} \right)^m + \alpha_I \left(\frac{\hat{I}(\tau)}{I_{ref}} \right)^n + \beta \sigma(w^T h_\tau + b) \right] d\tau \right), \hat{y}_{t:t+\Delta} = \text{LSTM}_\theta(x_{0:t}); \quad (15)$$

бу ерда $x_{0:t} = [U_{dc}, I_{dc}, U_{ac}, I_{ac}, P, Q, \cos \varphi, f, T, \dots]$ — реал вақт кириш векторлари; $\hat{y}_{t:t+\Delta} = \{\hat{T}(\tau), \hat{I}(\tau), \dots\}$ — LSTM прогноз қилган параметрлар; биринчи қисм (α_T, α_I, m, n) — термик/ток таъсирига асосланган деградация; иккинчи қисм ($\sigma(\cdot), h_\tau$) — LSTM яширин ҳолатидан ҳисобланадиган риск (аномалия эҳтимоли); $\hat{\mathcal{R}}(t + \Delta)$ — прогноз қилинган ишончилик ($0 \dots 1$).

8. Марказлашган инвертор ишончилигини индикаторлар асосида классификациялаш иссиқлик харитаси асосида амалга оширилади. Марказлашган инвертор ишончилиги бир қатор асосий индикаторлар — термик таъсир, рипл ток, гармоник бузилишлар, совитиш тизими ҳолати, кучланиш оғиши ва авариялар частотаси бўйича классификация қилинди. Яшил ранг инверторнинг нормал иш режимида эканини, параметрлар белгиланган меъёрий чегараларда сақланаётганини кўрсатади. Сарик ранг огоҳлантириш ҳолатини ифодалаб, айрим параметрларда меъёрдан оғишлар кузатилаётганини англатади ва профилактик чоралар кўриш зарурлигини билдиради. Қизил ранг эса критик ҳолатни акс эттириб, масалан термик таъсир ёки совитиш тизими билан боғлиқ муаммолар инвертор ишончилигига жиддий хавф туғдираётганини кўрсатади (6-расм).

Марказлашган инвертор ишончилигини индикаторлар асосида классификациялаш (Heatmap)



6-расм. Марказлашган инвертор ишончилигини индикаторлар асосида реал вақтда классификациялаш иссиқлик харитаси

Figure 6. Heat Map for Real-Time Classification of Centralized Inverter Reliability Based on Indicators

Бундай визуал классификация марказлашган инверторларнинг ҳолатини реал вақт режимида мониторинг қилиш учун тармоқ архитектураси натижасини тақдим этиш эксплуатация жараёнида қарор қабул қилишни соддалаштиради ҳамда техник хизмат кўрсатишда режалаштириш самарадорлигини оширишга имконини беради. Архитектурада Raspberry Pi 5 асосидаги бошқарув панели қўлланилиб, бу ишлаб чиқарувчиларнинг талабидан келиб чиқиб асосий платага ўтказиш учун ҳам қулай ҳисобланади.

Хулоса (Conclusions)

Бундай визуал классификация марказлашган инверторларнинг ҳолатини реал вақт режимида мониторинг қилиш учун тармоқ архитектураси натижасини тақдим этиш эксплуатация жараёнида қарор қабул қилишни соддалаштиради ҳамда техник хизмат кўрсатишда режалаштириш самарадорлигини оширишга имконини беради. Архитектурада Raspberry Pi 5 асосидаги бошқарув панели қўлланилиб, бу ишлаб чиқарувчиларнинг талабидан келиб чиқиб асосий платага ўтказиш учун ҳам қулай ҳисобланади.

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., 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).

REFERENCES

13. 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.
14. 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).
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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).
19. 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.



20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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).