



ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ (ИСМДЭГТУ)

Орлов А.А., Крылова Е.В., Щербаков В.М., Авдеев А.Д.

«Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

ele-krylova@yandex.ru

Резюме: В статье анализируется программно-аппаратный комплекс ИСМДЭГТУ, предназначенный для мониторинга и контроля состояния элементов основного технологического оборудования в сфере электроэнергетики. Система ИСМДЭГТУ предоставляет возможность оценивать текущее техническое состояние элементов газотурбинных установок (ГТУ), что существенно снижает риски внеплановых остановок, позволяет прогнозировать деградацию оборудования и разрабатывать стратегии для повышения его эффективности и продления срока службы. Особое внимание уделяется мерам, направленным на обеспечение безопасности функционирования аппаратной инфраструктуры ИСМДЭГТУ и достижению целей информационной безопасности, что становится особенно актуальным в условиях современных вызовов.

Ключевые слова: АСУ ТП; ИСМДЭГТУ; интеллектуальная система мониторинга; диагностика элементов; газотурбинные установки; ГТУ; мониторинг; диагностика.

Благодарности: Работа, по результатам которой выполнена статья, выполнена в рамках Указа Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 г. № 529 "Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий".

Для цитирования: Орлов А.А., Крылова Е.В., Щербаков В.М., Авдеев А.Д. Интеллектуальная система мониторинга и диагностики элементов газотурбинной установки (ИСМДЭГТУ) // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 211-221. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-211-221.

INTELLIGENT SYSTEM FOR MONITORING AND DIAGNOSTICS OF GAS TURBINE INSTALLATION ELEMENTS (ISMDEGTU)

Orlov A.A., Krylova E.V., Shcherbakov V.M., Avdeev A.D.

"National Research University" «MEI», Moscow, Russia

ele-krylova@yandex.ru

Abstract: The article analyzes the software and hardware complex of ISMDEGTU, designed to monitor and control the condition of the elements of the main technological equipment in the field of electric power industry. The ISMDEGTU system provides an opportunity to assess the current technical condition of the elements of gas turbine installations (GTU), which significantly reduces the risks of unscheduled shutdowns, allows you to predict equipment degradation and develop strategies to increase its efficiency and extend its service life. Special attention is paid to measures aimed at ensuring the security of the functioning of the ISMDEGTU hardware infrastructure and achieving information security goals, which is becoming especially relevant in the context of modern challenges.

Keywords: APCS, ISMDEGTU, intelligent monitoring system; diagnostics of elements; gas turbine installations; GTU; monitoring; diagnostics.

For citation: Orlov A.A., Krylova E.V., Shcherbakov V.M., Avdeev A.D. Intelligent system for

monitoring and diagnostics of gas turbine installation elements (ISMDEGTU). *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (2): 211-221. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-211-221.

Введение (Introduction)

Современные энергетические системы (СЭС) - это сложные территориально распределённые технические объекты энергетической отрасли, созданные человеком при использовании инновационных технологий для производства, распределения, передачи, хранения и потребления электроэнергии в энергетической отрасли.

СЭС должны служить различным производственным и бытовым целям, удовлетворяя потребности конечного потребителя наименее затратным способом и тесно связаны с применением газовых турбин, в том числе газотурбинных установок большой мощности, используемых для производства электроэнергии и в различных промышленных областях. Их эффективная эксплуатация требует повышения параметров рабочего цикла, внедрения современных методов диагностики и совершенствования систем управления.

В условиях санкций отечественные производители газотурбинного оборудования [1-4] столкнулись со сложностями в приобретении современных комплексов автоматизированных систем управления технологическими процессами АСУ ТП, необходимых для удаленного мониторинга и диагностики производимых ими газотурбинных установок.

Стоимость иностранных предложений, традиционно закупаемых через посредников, в последнее время заметно возросла, процесс закупки стал занимать гораздо больше времени, а модернизация и ремонт элементов иностранных комплексов из-за санкций стал попросту невозможным.

Требования по импортозамещению также накладывают ограничения на использование иностранного оборудования и программного обеспечения, используемых в системах удаленного мониторинга и диагностики ГТУ.

Исследования проведенные в [5-16] показали сложность в создании интеллектуальных систем мониторинга и диагностики энергетических и энергоёмких объектов из-за:

- **сложности оперативного анализа** и математического моделирования по причине сложности анализа пульсации в камерах сгорания и/или сложности описания газодинамических процессов, которые приводят к сложно выявляемым и быстро развивающимся критическим дефектам рабочих лопаток газовых турбин, а для построения эффективной подсистемы предиктивной аналитики как правило недостаточно имеющегося количества необходимых параметрических датчиков (вибраций, давления, температуры, и прочих параметров).

- **необходимости работы с огромными объёмами** параметрических данных, поэтому современное информационное обеспечение для решения задач управления режимами технологического объекта предоставляют большие объёмы информации, но на практике полезно используется только незначительная часть этой технологической информации.

- **сложности промышленного использования** и внедрения в генерирующую часть энергетической отрасли (из-за технологических особенностей и применяемых принципов управления в электротехнической части энергетики перейти к цифровизации проще и быстрее, чем в генерирующей, а особенно в тепловой части отрасли).

- **устаревших нормативных документов**, что приводит к проблемам в эксплуатации технологических энергетических объектов при развитии цифровизации энергетической отрасли.

- **зависимости от импорта**, что стратегически негативно отражается на безопасности энергетической отрасли в целом.

- **потребности в высококвалифицированных** управленческих кадрах, при этом от технического персонала требуется неукоснительное соблюдение технологической дисциплины, независимо от выполняемых им функций – как контроллера, так и непосредственного участника технологического процесса управления энергетическим объектом.

Разработка интеллектуальной АСУ ТП удаленного мониторинга и диагностики газовых турбин является важной задачей для обеспечения их надежности. Газотурбинные установки подвержены износу и неисправностям, что может привести к

простоям, потере производственных мощностей и значительным финансовым потерям. Традиционные методы диагностики не всегда позволяют оперативно выявлять скрытые неисправности, что требует применения более эффективных технологий мониторинга и прогнозирования отказов.

Интеллектуальные системы диагностики представляют собой сочетание передовых алгоритмов, моделей и программных средств, способных анализировать данные о состоянии газовых турбин. Использование машинного обучения, статистического анализа и методов искусственного интеллекта позволяет выявлять аномалии в работе оборудования и прогнозировать возможные неисправности. Эти системы работают в режиме реального времени, обеспечивая оперативное реагирование на изменения параметров работы турбин и предупреждая операторов о возможных проблемах.

Ключевыми аспектами работы системы являются **сбор и обработка данных** о состоянии турбин. Для этого устанавливаются сенсоры и датчики, измеряющие параметры работы, такие как температура, давление, вибрация и другие. Полученные данные передаются на центральный сервер, где анализируются с использованием специализированных алгоритмов.

Разработка интеллектуальной системы требует проведения анализа существующих методов диагностики, моделирования рабочих процессов, создания алгоритмов обработки данных и их тестирования. Необходимо определить требования к разрабатываемой системе, включая функциональные возможности, производительность, надежность и безопасность. Эти требования формируют основу для архитектуры системы и выбора подходящих технологий.

После разработки и тестирования алгоритмов следует этап внедрения в промышленные условия. Это включает в себя установку системы диагностирования на реальных объектах, обучение персонала и последующую оценку эффективности работы системы в условиях эксплуатации. Важно учитывать возможность адаптации системы к изменяющимся условиям эксплуатации, что повысит её точность и надежность.

ИСМДЭГТУ - это интеллектуальный программно-аппаратный комплекс, разработанный в рамках совместного взаимодействия кафедр АСУ ТП и АЭС ИТАЭ ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», обеспечивающий удалённое наблюдение и контроль за состоянием основного технологического оборудования в электроэнергетике. Он позволяет оценивать текущее техническое состояние ГТУ, снижать риски внеплановых остановов, прогнозировать темп деградации оборудования, определять необходимые меры для повышения эффективности и срока службы, а также планировать мероприятия по обслуживанию.

Система разработана для мониторинга газотурбинных установок, газоперекачивающих агрегатов и оборудования энергоблоков ПГУ, включая паровые турбины, генераторы и дожимные компрессоры. Информация, используемая в ИСМДЭГТУ, включает показания штатных приборов (более 3500 сигналов с каждой ГТУ, из них 600 - в режиме реального времени), отчёты по результатам предыдущего сервисного обслуживания и испытаний, а также инструкции по эксплуатации и информационные бюллетени [17].

Система применяет **различные методы диагностики**, такие как сравнительный анализ трендов и сравнение с «идеальными моделями», анализ временных рядов долгосрочных трендов и взаимосвязанных параметров, факторный анализ, оценка скорости деградации элементов и применение математических моделей оценки. Ключевые функции системы включают удалённое управление, которое позволяет воздействовать на оборудование для изменения его параметров или отключения, оценку остаточного ресурса с прогнозированием аварий и предоставлением рекомендаций по устранению неисправностей, обеспечение безопасности с использованием сертифицированных средств защиты информации, включая криптографическую защиту и контроль сетевого взаимодействия, а также хранение данных на территории РФ для обеспечения безопасности собранной информации.

Регулярный анализ данных, предоставляемых ИСМДЭГТУ, **гарантирует надёжную работу оборудования**, позволяя точно оценивать его состояние для своевременного ремонта и замены деталей. Пример обработки результатов в ИСМДЭГТУ представлен на (рис.1).

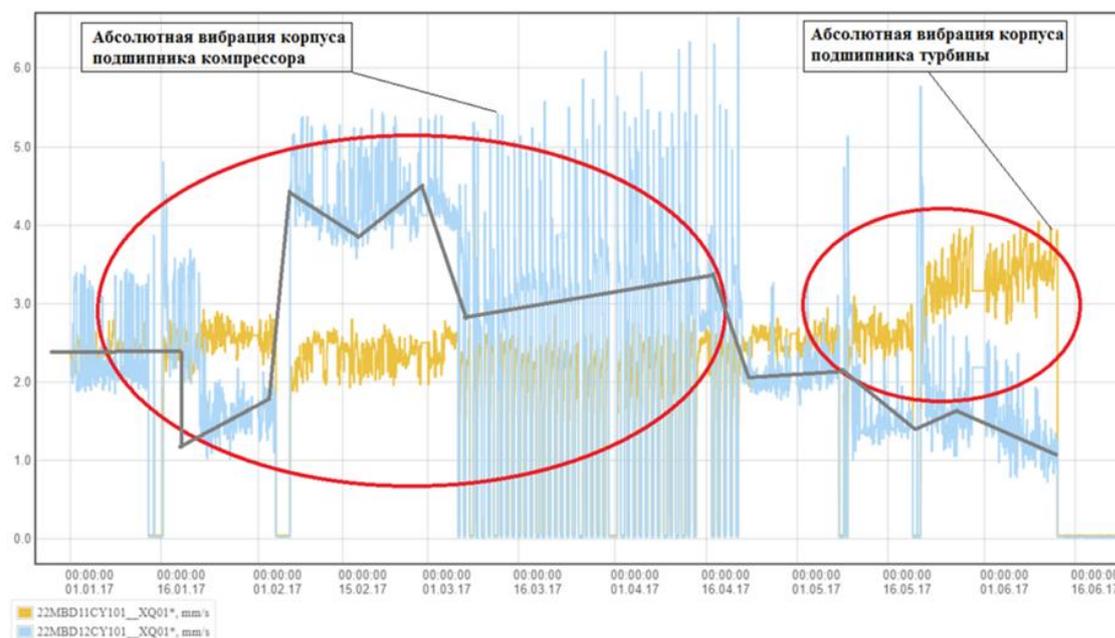


Рис. 1. Пример обработки результатов в ИСМДЭГТУ Fig. 1. An example of the results processing in ISMDEGTU

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

Особенности ИСМДЭГТУ:

- **Возможность прогнозирования.** Система позволяет прогнозировать темп деградации оборудования, определять объём необходимых воздействий для повышения эффективности и срока службы, планировать мероприятия по обслуживанию оборудования.
- **Сбор сведений.** Система получает данные от автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП), управляющей газовой турбиной.
- **Передача и хранение сведений.** Передача потоковых данных от АСУ ТП на сервер аккумуляции и коммутации происходит по протоколу TCP/IP (OPC). Внутри сервера аккумуляции и коммутации данные передаются по протоколу UDP. От сервера ИСМДЭГТУ потребителям - по протоколу ГОСТ Р МЭК 60870-5-104.
- **Обработка сигналов.** Получаемые сигналы обрабатываются с помощью специального программного обеспечения, которое не входит в поставку ИСМДЭГТУ.
- **Контроль состояния и анализ отклонений.** ИСМДЭГТУ позволяет снизить риски внеплановых остановов за счёт контроля состояния и анализа отклонений, выявляемых в ходе эксплуатации оборудования.
- **Модернизация сервера аккумуляции и коммутации.** Сервер можно модернизировать так, чтобы была возможность обеспечить однонаправленную или двунаправленную передачу данных из контура АСУ ТП.

Таблица 1 содержит мероприятия по информационной безопасности для Интеллектуальной системы управления мониторинга и диагностики (ИСМДЭГТУ). Прежде всего, важным аспектом является контроль физического доступа, который гарантирует защиту аппаратной инфраструктуры ИСМДЭГТУ от несанкционированного доступа.

Кроме того, установка и администрирование системы должны строго соответствовать политике информационной безопасности [18], установленной субъектом электроэнергетики. Это позволяет обеспечить надежную защиту данных на всех уровнях системы.

Также необходимо повысить осведомленность администраторов, которые должны пройти специальные обучающие курсы и получить сертификаты, что включает в себя глубокие знания о требованиях безопасности, действующих в России.

Наконец, важно четко определить роль администратора информационной безопасности в организационной структуре, что должно сопровождаться обязательным соблюдением установленного штатного расписания. Все эти мероприятия способствуют созданию надежной системы защиты информации в ИСМДЭГТУ.

Минимальный комплекс мероприятий для обеспечения безопасности среды функционирования аппаратной инфраструктуры ИСМДЭГТУ организационных требований к обеспечению информационной безопасности аппаратной инфраструктуры ИСМДЭГТУ
The minimum set of measures to ensure the security of the environment of the ISMDEGTU hardware infrastructure and organizational requirements for ensuring the information security of the ISMDEGTU hardware infrastructure

№ п/п	Мероприятие	Описание
1	Контроль физического доступа	В местах размещения аппаратной инфраструктуры ИСМДЭГТУ должен быть обеспечен контроль физического доступа.
2	Безопасная установка	Процесс установки, инсталляции и администрирования аппаратной инфраструктуры, программного обеспечения ИСМДЭГТУ должен соответствовать требованиям политики информационной безопасности, утвержденной собственником или иным законным владельцем объекта электроэнергетики. Контроль соответствия требований информационной безопасности осуществляется субъектом электроэнергетики.
3	Повышение осведомленности	Администраторы ИСМДЭГТУ должны пройти обучение способам администрирования программного обеспечения и получить сертификат об окончании обучения. В составе программы обучения должны входить мероприятия по получению знаний и навыков реализации требований информационной безопасности, действующих в Российской Федерации.
4	Администрирование безопасности	В рамках организационной структуры подразделения, эксплуатирующего программное обеспечение, должна быть предусмотрена роль администратора информационной безопасности. Роль администратора информационной безопасности должна быть регламентирована и утверждена субъектом электроэнергетики. В качестве исполнителя роли администратора информационной безопасности может быть только сотрудник объекта в соответствии со штатным расписанием.

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

Описание целей информационной безопасности ИСМДЭГТУ, организационных требований к обеспечению контроля информационной безопасности ИСМДЭГТУ

Description of the information security objectives of ISMDEGTU, organizational requirements for ensuring information security control of ISMDEGTU

№ п\п	Цель информационной безопасности	Идентификатор	Описание
1.	Аудит событий	O.AUDITING	Программное обеспечение должно обеспечивать: а) генерацию, запись и хранение событий информационной безопасности относящихся к функционированию встроенных средств защиты (при этом генерация, запись и хранение событий информационной безопасности должны осуществляться за счет инфраструктуры, расположенной на территории Российской Федерации); б) защиту данных журналов (доступ к журналам разрешен пользователям, имеющим право допуска, правила получения, которого устанавливаются субъектом электроэнергетики). Информация, хранящаяся в журналах, должна содержать: а) дату (день, месяц и год) и время (часы, минуты, секунды) произошедшего события информационной безопасности, идентификационные данные пользователя, от имени которого совершалось действие или был запущен процесс, повлекший наступление события информационной безопасности; б) подробное описание предпринимаемых действий для последующего их анализа, выявления попыток несанкционированного доступа или несанкционированной модификации компонент программного обеспечения.
2.	Криптографическая защита	O.CRYPTO	Программное обеспечение должно обеспечивать целостность и конфиденциальность информации. Целостность и конфиденциальность информации обеспечиваются средствами криптографической защиты. Удаленное соединение должно обеспечиваться совместно со средствами криптографической защиты. В рамках открытых сессий обмена данными должны использоваться средства криптографической защиты. В случае с распределенной сетью хранения и получения данных должны использоваться средства криптографической защиты.
3.	Дискретный доступ	O.DACCESS	Программное обеспечение должно осуществлять контроль доступа персонала на основе идентификаторов объектов. Доступ к объектам пользователей должен осуществляться на основании правил доступа персонала к объектам.
4.	Контроль сетевого взаимодействия	O.NFLOW	Программное обеспечение должно осуществлять контроль взаимодействия и передачи информации между сетевыми интерфейсами (в том числе виртуальными), между субъектами, между внутренними функциями на основании настраиваемой политики безопасности в рамках функций ИСМДЭГТУ.

5.	Передача атрибутов безопасности	O.SUBJECT	При взаимодействии пользователей программное обеспечение должно обеспечивать передачу атрибутов безопасности в соответствии с настраиваемой политикой безопасности.
6.	Идентификация и аутентификация	O.I&A	Программное обеспечение должно обеспечивать идентификацию и аутентификацию пользователей для любых действий на основе сертификата открытого ключа подписи и связанного с ним закрытого ключа подписи, размещенного на отчуждаемом носителе. Доступ к программному обеспечению ИСМДЭГТУ должен предоставляться только авторизованным пользователям. Должна быть обеспечена многофакторная аутентификация с использованием доступных для субъектов электроэнергетики средств.
7.	Конфигурация безопасности	O.MANAGE	Программное обеспечение должно содержать необходимые механизмы для управления и настройки всех имеющихся функций безопасности. Доступ к этим механизмам должен быть обеспечен только авторизованным пользователям с выделенной ролью администратора информационной безопасности. Программное обеспечение должно иметь возможность указывать на ошибки персонала при конфигурации, а также должно запрещать возможность снижения уровня безопасности. Применяемые средства защиты информации должны соответствовать пунктам 19-22 Требований к созданию систем безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации и обеспечению их функционирования, утвержденных приказом ФСТЭК России от 21.12.2017 №235 (зарегистрирован Минюстом России 22.02.2018, регистрационный № 50118).
8.	Установление защищенных соединений	O.TRUSTCHAN	Программное обеспечение должно быть спроектировано и разработано таким образом, чтобы позволять установление защищенного соединения с информационными системами того же класса доверия, гарантируя при этом целостность, доступность и конфиденциальность передаваемых в рамках соединения данных, взаимную авторизацию и возможность обмена атрибутами безопасности.

9.	Доступность	O.AVAIL	<p>Функционирование программного обеспечения должно осуществляться на постоянной основе. В случае выходов из строя каналов связи функционирование программного обеспечения должно продолжаться. Должны быть предусмотрены механизмы обеспечения продолжения функционирования при переполнении баз данных. Должен осуществляться контроль целостности компонентов ИСМДЭГТУ в процессе их загрузки и эксплуатации. Должно быть исключено неконтролируемое, несанкционированное вмешательство в процессы перезагрузки или восстановления после сбоев компонентов программного обеспечения ИСМДЭГТУ. В процессе функционирования программного обеспечения ИСМДЭГТУ должны быть предусмотрены на периодической основе проверки на наличие уязвимостей компонентов программного обеспечения ИСМДЭГТУ. Должны быть предусмотрены возможности восстановления данных и (или) параметров конфигураций компонентов программного обеспечения ИСМДЭГТУ из резервных копий в случае их компрометации, уничтожения, ошибочного изменения, замены аппаратного обеспечения ИСМДЭГТУ. Должны быть предусмотрены возможности создания резервных копий в случае внесения изменений в конфигурации, с заданной периодичностью или комбинации этих вариантов персоналом субъекта электроэнергетики вручную или автоматически с использованием прикладного программного обеспечения.</p>
----	-------------	---------	---

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

Криптографическая защита играет свою незаменимую роль, обеспечивая целостность и конфиденциальность данных [18]. Она использует современные средства для защиты удаленных соединений и обмена информацией в распределенных сетях. Дискретный доступ контролирует доступ персонала к объектам на основе их идентификаторов и установленных правил, что способствует повышению уровня безопасности.

Контроль сетевого взаимодействия включает в себя внимательное мониторингирование передачи информации между сетевыми интерфейсами и внутренними функциями, строго следуя установленной политике безопасности. Передача атрибутов безопасности обеспечивает соблюдение правил при взаимодействии пользователей, создавая тем самым защитную оболочку для операций.

Идентификация и аутентификация требуют внедрения сертификатов и многофакторной аутентификации, что позволяет надежно авторизовывать действия пользователей. В завершение, конфигурация безопасности включает механизмы управления функциями безопасности, доступ к которым ограничивается администраторам. Это необходимо для предотвращения ошибок конфигурации и снижения уровня безопасности, при этом все действия строго соответствуют требованиям ФСТЭК России.

Выводы (Conclusions)

- Статья акцентирует внимание на важности программно-аппаратного комплекса ИСМДЭГТУ для эффективного управления состоянием элементов газотурбинных установок в энергетической и других сферах.
- Внедрение данного комплекса не только обеспечивает возможность мониторинга и контроля, но и значительно снижает риски внеплановых остановок, что крайне важно для стабильности энергетических систем.
- Гарантия безопасности работы аппаратной инфраструктуры ИСМДЭГТУ и достижение целей информационной безопасности становятся ключевыми задачами в условиях современных вызовов, включая киберугрозы.

Литература

1. Соколов В.С. Газотурбинные установки. – М.: Высшая школа, 1986 – 151 с.
2. Вибрационный контроль технического состояния газотурбинных

газоперекачивающих агрегатов / Ю.Н. Васильев, М.Е. Бесклетный, Е.А. Игуменцев и др. – М.: Недра, 1987 – 197 с.

3. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 1987 – 288 с.

4. Вибромониторинг и диагностика – основа достоверной информации о состоянии ГПА / С. Зарицкий, А. Стрельченко, В. Тимофеев и др. // Газотурбинные технологии. – 2000 – Л. – С. 24-26.

5. L. Enochson, G.Smith. Examples of Digital Data Analysis for Rotating Machinery. Presented at National Conference on Power Transmission. Philadelphia, Pennsylvania. 1978 GenRad, Application Note 13, pp. 7.

6. Fentaye A.D., Baheta A.T., Gilani S.I., Kyprianidis K.G. A Review on Gas Turbine Gas-Path Diagnostics: State-of-the-Art Methods, Challenges and Opportunities. Aerospace, 2019, vol. 6, no. 7, p. 83. DOI: 10.3390/aerospace6070083

7. Siciński S., Kostka P.S., Tkacz E.J. Heart rate variability analysis on electrocardiograms, seismocardiograms and gyrocardiograms on healthy volunteers. Sensors, 2020, vol. 20, no. 16, pp. 4522. DOI: 10.3390/s20164522

8. Щербаков, В. М. Интеллектуализация автоматизированного параметрического диагностирования элементов газотурбинных двигателей (ГТД) большой мощности / В. М. Щербаков, Е. А. Пыткина // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : Тезисы докладов Тридцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, 29 февраля – 02 2024 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг " РАДУГА", 2024. – С. 1040. – EDN LPWKMG.

9. Интеллектуальная Система автоматического управления технологическими режимами работы энергоемкого агрегата / А. А. Орлов, Е. В. Крылова, В. М. Щербаков [и др.] // Электротехническая сталь 2024 : Сборник материалов научно-технической конференции, Москва, 30–31 мая 2024 года. – Москва: Национальный исследовательский технологический университет "МИСИС", 2024. – С. 13-14. – EDN UACGKN.

10. Применение отечественного микроконтроллера МИК-32 при автоматизации диагностического оборудования в теплоэнергетике / А. А. Орлов, Е. В. Крылова, А. В. Сириченко [и др.] // Проблемы современной теплоэнергетики : сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию специальности «Промышленная теплоэнергетика» в ЛГТУ, 70-летию Липецкой области и 90-летию Новолипецкого металлургического комбината, Липецк, 06 декабря 2024 года. – Казань: Общество с ограниченной ответственностью "Бук", 2024. – С. 192-199. – EDN CVRHVD.

11. Мацко, К. О. Анализ применимости системы прогностического обслуживания и ремонта по состоянию для АСУТП объектов энергетики / К. О. Мацко // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : Тезисы докладов Двадцать девятой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, 16–18 марта 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг " РАДУГА", 2023. – С. 922. – EDN HWAЕЕМ.

12. Автоматизированная система производственного неразрушающего контроля / А. Н. Рыков, О. Н. Будадин, С. Н. Сычугов [и др.] // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2020. – № 4. – С. 8-16. – DOI 10.25791/asu.4.2020.1172. – EDN MZSYSH.

13. Исследование возможности КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ многопараметрового неразрушающего контроля сложных конструкций / А. А. Бекаревич, О. Н. Будадин, В. И. Крайний, А. Н. Пичугин // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 2. – С. 75-80. – EDN PWCSXT.

14. Бекаревич, А. А. Исследование возможности автоматизированной дефектоскопии материалов с распознаванием малоразмерных дефектов в условиях неопределенности их формы / А. А. Бекаревич, О. Н. Будадин, А. Н. Пичугин // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 3. – С. 29-33. – EDN PXHUXB.

15. Бекаревич, А. А. Обнаружение дефектов сложных конструкций на основе комплексирования информации многопараметрового неразрушающего контроля / А. А. Бекаревич // Цветные металлы. – 2013. – № 3(843). – С. 82-88. – EDN PXVXKH.

16. Крайний, В. И. Оптимизация многопараметрового неразрушающего контроля материалов, конструкций и объектов / В. И. Крайний, О. Н. Будадин, А. А. Бекаревич // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. – 2012. – № 8(8). – С. 26. – EDN QZPOGN.

17. Турбины газовые. Сбор данных и требования к системе контроля изменений

для газотурбинных установок. – М.: Стандартинформ, 2017. – 42 с.

18. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 6 ноября 2018 г. № 1015 “Об утверждении требований в отношении базовых (обязательных) функций и информационной безопасности объектов электроэнергетики при создании и последующей эксплуатации на территории Российской Федерации систем удаленного мониторинга и диагностики энергетического оборудования”. [Электронный ресурс].

Авторы публикации

Орлов Антон Андреевич - канд. техн. наук, доцент, доцент каф. АСУ ТП. OrlovAA@mpei.ru

Крылова Елена Владимировна – канд. пед. наук, доцент, доцент каф. АЭС. ele-krylova@yandex.ru

Щербakov Владислав Михайлович – аспирант каф. АСУ ТП. ShcherbakovVM@mpei.ru

Авдеев Андрей Денисович – студент каф. АСУ ТП. AvdeevADen@mpei.ru

References

1. Sokolov B.C. Gas turbine installations. – М.: Higher School, 1986 – 151 p.
2. Vibration control of the technical condition of gas turbine gas pumping units / Yu.N. Vasiliev, M.E. Beskletny, E.A. Igumentsev et al. – М.: Nedra, 1987 – 197 p.
3. Genkin M.D., Sokolova A.G. Vibroacoustic diagnostics of machines and mechanisms. Moscow: Mashinostroenie, 1987 – 288 p.
4. Vibration monitoring and diagnostics – the basis of reliable information about the state of the GPA / S. Zaritsky, A. Strelchenko, V. Timofeev et al. // Gas turbine technologies. – 2000 – L. – S. 24-26.
5. L. Enochson, G.Smith. Examples of Digital Data Analysis for Rotating Machinery. Presented at the National Conference on Power Transmission. Philadelphia, Pennsylvania. 1978 GenRad, Application Note 13, pp. 7.
6. Fentaye A.D., Baheta A.T., Gilani S.I., Kyprianidis K.G. A Review on Gas Turbine Gas-Path Diagnostics: State-of-the-Art Methods, Challenges and Opportunities. Aerospace, 2019, vol. 6, no. 7, p. 83. DOI: 10.3390/aerospace6070083
7. Sיעiński S., Kostka P.S., Tkacz E.J. Heart rate variability analysis on electrocardiograms, seismocardiograms and gyrocardiograms on healthy volunteers. Sensors, 2020, vol. 20, no. 16, pp. 4522. DOI: 10.3390/s20164522
8. Shcherbakov, V. M. Intellectualization of automated parametric diagnostics of high-power gas turbine engine elements / V. M. Shcherbakov, E. A. Pytkina // Radio electronics, electrical engineering and power engineering : Abstracts of the Thirtieth International Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduates, Moscow, February 29 – 02, 2024. – Moscow: Limited Liability Company "Center of printing services "RADUGA", 2024. – p. 1040. – EDN LPWKMG.
9. Intelligent automatic control system for technological modes of operation of an energy-intensive unit / A. A. Orlov, E. V. Krylova, V. M. Shcherbakov [et al.] // Electrotechnical steel 2024 : Proceedings of the scientific and technical conference, Moscow, May 30-31, 2024. – Moscow: National Research Technological University "MISIS", 2024. – pp. 13-14. – EDN UACGKN.
10. Application of the domestic microcontroller MIK-32 in automation of diagnostic equipment in thermal power engineering / A. A. Orlov, E. V. Krylova, A.V. Sirichenko [et al.] // Problems of modern thermal power engineering : proceedings of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 50th anniversary of the specialty "Industrial thermal Power Engineering" at LGTU, the 70th anniversary of Lipetsk the region and the 90th anniversary of the Novolipetsk Metallurgical Plant, Lipetsk, December 06, 2024. Kazan: Buk Limited Liability Company, 2024. pp. 192-199. EDN CVRHVD.
11. Matsko, K. O. Analysis of the applicability of predictive maintenance and repair systems for automated control systems of energy facilities / K. O. Matsko // Radio electronics, electrical engineering and power engineering : Abstracts of the Twenty-ninth International Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduates, Moscow, March 16-18, 2023. – Moscow: Limited Liability Company "Center of printing services "RADUGA", 2023. – p. 922. – EDN HWAEEM.
12. Automated system of industrial non-destructive testing / A. N. Rykov, O. N. Budadin, S. N. Sychugov [et al.] // Industrial automated control systems and controllers. – 2020. – No. 4. – pp. 8-16. – DOI 10.25791/asu.4.2020.1172. – EDN MZSYSH.
13. A. A. Bekarevich, O. N. Budadin, V. I. Krainy, A. N. Pichugin, A. N. Pichugin, A study of

the possibility of INTEGRATING INFORMATION of multiparameter non-destructive testing of complex structures. *Diagnostics*. – 2013. – No. 2. – pp. 75-80. – EDN PWCSXT.

14. Bekarevich, A. A. Investigation of the possibility of automated flaw detection of materials with the recognition of small-sized defects in conditions of uncertainty of their shape / A. A. Bekarevich, O. N. Budadin, A. N. Pichugin // *Control. Diagnostics*. – 2013. – No. 3. – pp. 29-33. – EDN PXHUXB.

15. Bekarevich, A. A. Detection of defects in complex structures based on the integration of information from multiparameter non-destructive testing / A. A. Bekarevich // *Non-ferrous metals*. – 2013. – № 3(843). – Pp. 82-88. – EDN PXVXXH.

16. Krainy, V. I. Optimization of multiparameter non-destructive testing of materials, structures and objects / V. I. Krainy, O. N. Budadin, A. A. Bekarevich // *Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University*. – 2012. – № 8(8). – P. 26. – EDN QZPOGN.

17. Gas turbines. Data collection and requirements for a change control system for gas turbine installations. Moscow: Standartinform, 2017. 42 p.

18. Order No. 1015 of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated November 6, 2018 "On Approval of Requirements for Basic (Mandatory) Functions and Information Security of Electric Power Facilities during the Creation and Subsequent Operation of Remote Monitoring and Diagnostic Systems for Power Equipment in the Russian Federation". [electronic resource].

Authors of the publication

Anton A. Orlov - "National Research University" «MEI», Moscow, Russia.
OrlovAA@mpei.ru

Elena V. Krylova, Elena - "National Research University" «MEI», Moscow, Russia.. elekrylova@yandex.ru

Vladislav M. Shcherbakov - "National Research University" «MEI», Moscow, Russia..
ShcherbakovVM@mpei.ru

Andrey D. Avdeev - "National Research University" «MEI», Moscow, Russia..
AvdeevADen@mpei.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **12.03.2025 г.**

Отредактировано **31.03.2025 г.**

Принято **15.04.2025 г.**