

## Система мониторинга и вибродиагностики

В. С. Карелин<sup>1</sup>, П. В. Соколов<sup>1</sup>, А. В. Кистойчев<sup>2</sup>, О. В. Красносельцев<sup>2</sup>, А. В. Попов<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> АО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия

✉ karelinvld@gmail.com

**Аннотация.** Формируются требования для системы мониторинга и диагностики энергетического оборудования, например паровых турбин, на основании вибрационных параметров, определяет уровни алгоритмов ее работы. На основании требований в статье отражены принципы построения данной системы, а также результаты ее работы на основании приведенных примеров. В качестве материалов для данной работы были использованы существующие методы создания подобных систем, опыт наладки и эксплуатации турбинного оборудования, а также опыт разработки систем предиктивной диагностики АО «Силовые машины». В результате работы сформированы требования к следующим шагам по развитию подобных систем.

**Ключевые слова:** паровая турбина, вибрация, техническая диагностика, мониторинг, режимы работы турбины

**Для цитирования:** Система мониторинга и вибродиагностики / В. С. Карелин, П. В. Соколов, А. В. Кистойчев, О. В. Красносельцев, А. В. Попов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 5. С. 45–52. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-5-45-52.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

## Monitoring and Vibration Diagnostics System

V. S. Karelin<sup>1</sup>, P. V. Sokolov<sup>1</sup>, A. V. Kistoichev<sup>2</sup>, O. V. Krasnoseltsev<sup>2</sup>, A. V. Popov<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> JSC «Power machines», Saint Petersburg, Russia

✉ karelinvld@gmail.com

**Abstract.** The article forms the requirements for the monitoring and predictive diagnostics system based on vibration parameters and determines the levels of its operation algorithms. The article reflects the principles of constructing this system based on the requirements, as well as the results of its operation based on the examples provided. The existing methods of creating similar systems, the experience of adjusting and operating turbine equipment, and the experience of developing predictive diagnostics systems at Power Machines JSC were used as materials for this work. As a result of the work, requirements for the next steps in developing similar systems were formed.

**Keywords:** steam turbine, vibration, technical diagnostics, monitoring, turbine operating modes

**For citation:** Monitoring and Vibration Diagnostics System / V. S. Karelin, P. V. Sokolov, A. V. Kistoichev, O. V. Krasnoseltsev, A. V. Popov // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 5. P. 45–52. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-5-45-52.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Введение.** В современных условиях динамично развивающегося энергетического сектора, где вопросы рентабельности, безопасности и устойчивости выходят на первый план, требова-

ния заказчиков к управлению активами существенно трансформировались. Сегодня ключевым приоритетом становится не просто поставка оборудования, а формирование комплексного подхода к его эксплуатации, направленного на достижение максимальной эффективности на всех этапах жизненного цикла – от ввода в эксплуатацию до вывода из нее. Это подразумевает необходимость решения целого спектра взаимосвязанных задач: от тонкой настройки рабочих режимов для минимизации энергопотерь до разработки стратегий предиктивного обслуживания, способных предотвратить критические сбои.

В частности, актуальными остаются вопросы сокращения количества аварийных остановов, которые не только приводят к прямым финансовым потерям из-за простоя, но и создают риски для экологической безопасности. Не менее важна оптимизация времени восстановления работоспособности оборудования за счет внедрения цифровых чек-листов, автоматизации диагностики и использования Big Data для прогнозирования отказов. Отдельное направление состоит в совершенствовании логистики запасных частей: от создания «умных» складов с динамическим управлением номенклатурой до интеграции систем искусственного интеллекта для расчета оптимальных страховых запасов, что позволяет снизить капитализацию в неликвидных ресурсах.

Представленные факторы и задачи подтолкнули к необходимости создания эффективного инструмента поддержки клиентов – системы мониторинга и диагностики технического состояния основного оборудования электростанций, важной частью которой должна была стать система диагностики по вибрационным параметрам.

**Требования к системе.** Проведенный анализ существующих систем мониторинга и диагностики энергетического оборудования позволил сформулировать предварительное видение системы вибрационной диагностики:

- система не должна быть «черным ящиком», из которого с заданной периодичностью эксплуатирующий персонал, а также завод-изготовитель получают отчет о техническом состоянии агрегата. Она должна быть «открытой» для персонала и производителя;

- система не должна на базе значительного числа введенных в нее данных находить зависимости между этими параметрами и выдавать это за конечный результат работы. Результаты системы должны быть понятны для персонала, эксплу-

атирующего энергетическое оборудование, предоставлять ему соответствующие рекомендации и представлять возможные причины выявленных отклонений, а также должны представлять ценность для изготовителя с последующим анализом и использованием при корректировке будущих конструкций и эксплуатационной документации;

- конечным результатом работы системы не может быть и таблица с баллами, которые набрал каждый из дефектов на основании того, что 10 или 15 параметров превысили заданную уставку – система должна быть понятной пользователю;

- система не должна представлять собой конструктор из алгоритмов, настраивать которые должен пользователь – она должна предоставлять конечный результат, а ее преднастройка должна проводиться заводом-изготовителем с возможным привлечением заказчика.

При разработке концептуальных основ системы вибрационной диагностики особое внимание было уделено глубокому анализу фундаментальных научно-технических работ, ставших классикой в данной области. Эти исследования, опубликованные в период расцвета вибродиагностики – с конца 1980-х до середины 1990-х гг., – заложили методологический базис для всего последующего развития отрасли. В тот период, характеризующийся активной цифровизацией промышленности и появлением первых микропроцессорных систем, сформировался уникальный пласт знаний, синтезировавший опыт эксплуатации энергетического оборудования с достижениями в области спектрального анализа, теории колебаний и надежности технических систем [1].

Все это позволило сформулировать основные положения и тезисы, которые легли в основу технического задания на разработку первого поколения автоматизированной системы вибрационной диагностики (см. таблицу).

Опираясь на сформулированные требования, была создана система диагностики паротурбинных агрегатов по вибрационным параметрам. В настоящий момент она обладает следующими характеристиками и особенностями:

- Система «верхнего» уровня подключается к существующим автоматизированным системам контроля вибрации турбоагрегата и АСУ ТП.

- Система осуществляет диагностирование во всем диапазоне режимов работы турбоагрегата (от ВПУ до угонных испытаний), при этом на каждом из режимов выполнена оптимизация числа диагностируемых дефектов.

Требования к системе  
 System requirements

| Требование                                                                                                             | Пояснение                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Система поддержки принятия решений                                                                                  | Ответственность за принятые решения должны нести люди. Мы предлагаем инструмент для того, чтобы процесс принятия решений был менее сложным                                                                                                                                     |
| 2. Специализированная система знаний в узкой области диагностирования мощных турбоагрегатов по вибрационным параметрам | Любая универсальность имеет под собой снижение эффективности. Диагностирование вспомогательного и основного оборудования должно быть построено на разных подходах                                                                                                              |
| 3. Надстройка к существующей системе контроля и мониторинга вибрации турбоагрегата                                     | Аппаратура контроля вибрации – это отдельная область знаний, в которой существуют признанные лидеры рынка, бороться с которыми на данном этапе нет необходимости                                                                                                               |
| 4. Масштабируемость и обучаемость                                                                                      | Система должна легко адаптироваться под всю линейку турбоагрегатов                                                                                                                                                                                                             |
| 5. Вероятностный подход с элементами нечеткой логики                                                                   | Вероятностный подход, безусловно, опирается на статистику проявления признака при определенном дефекте и вместе с тем учитывает еще и совпадение различных признаков, характерных для данного дефекта. Это делает его значительно менее критичным к представительности выборок |
| 6. Открытость пользователю                                                                                             | Система должна объяснять пользователю ход своих «рассуждений»                                                                                                                                                                                                                  |
| 7. Дружелюбный интерфейс                                                                                               | Интуитивно понятный интерфейс                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 8. Работа в режиме реального времени                                                                                   | Предоставление пользователю результатов работы со скоростью протекания процессов развития дефекта                                                                                                                                                                              |
| 9. Отработка принципов и подходов                                                                                      | Первое поколение системы задумывалось как промежуточный этап к созданию и развертыванию более продвинутой системы диагностирования, учитывающей пожелания конечных пользователей                                                                                               |
| 10. Видимый экономический эффект                                                                                       | Система должна позволять эксплуатирующему персоналу заблаговременно планировать закупку необходимых к замене запасных частей, тем самым, сокращая время простоя оборудования, которое оценивается в денежном эквиваленте                                                       |

• При диагностировании могут использоваться как отдельные показания датчиков абсолютной вибрации опор или относительной вибрации вала, так и показания этих датчиков совместно.

Важной характеристикой созданной системы служит ее микросерверная архитектура, при которой общая «картина» вибрационного состояния агрегата разбивается на элементарные паттерны (диагностические признаки), которые позволяют описать состояние агрегата простым «инженерным» языком.

Каждый паттерн технического состояния описывается простым алгоритмом, который легко проверить, модернизировать и настроить под особенности каждого конкретного агрегата без необходимости изменять общую структуру системы.

Алгоритмы функционирования системы диагностики могут быть разделены на 3 уровня:

• Алгоритмы первого уровня сравнивают вибрационные параметры с заданными уставками. Примерами таких алгоритмов служат модули идентификации повышенного уровня оборотной вибрации, двойной оборотной вибрации, низкоча-

стотной вибрации и т. д. Всего на момент написания статьи используется 11 подобных алгоритмов.

• Алгоритмы второго уровня осуществляют работу с массивами данных: анализируют параметры критических частот, анализируют тренды изменения параметров во времени (скачок, быстрый рост вибрации, монотонный рост вибрации), находят зависимости вибрационных и технологических параметров и т. д. Всего на момент написания статьи используется 17 подобных алгоритмов.

• Алгоритмы третьего уровня – диагностические матрицы, которые «аккумулируют» результаты работы алгоритмов первого и второго уровней и формируют вероятность наличия того или иного дефекта. Всего на момент написания статьи реализованы алгоритмы для идентификации 21 вида дефектов турбоагрегата и турбогенератора.

Система вибрационной диагностики формирует вероятности возможных дефектов в режиме реального времени с учетом поведения турбоагрегата на ВСЕХ режимах эксплуатации.

В течение всего цикла эксплуатации турбоагрегата между пуском и остановом признаки того или

инного дефекта накапливаются, а вероятности наличия дефекта с учетом выявленных признаков суммируются. При частоте вращения, равной 0 об/мин, накопленные вероятности обнуляются.

**Примеры работы системы.** Для иллюстрации работы системы и тех преимуществ, которые получает пользователь при ее применении, приведем примеры реализации диагностирования двух дефектов: вылета малоразмерной лопатки и задеваний в проточной части.

При вылете малоразмерной лопатки происходит кратковременный всплеск вибрации до относительно высоких уровней с последующим возвращением к нормальным значениям. Естественно, что при таких условиях однозначно утверждать, что произошел вылет лопатки, нельзя, так как это мог быть случайный всплеск. В этом случае важной особенностью системы становится способность «восстановить» последовательность развития дефекта и с учетом других признаков указать пользователю на его вероятность [1]. В случае вылета малоразмерной лопатки система запоминает, что на опорах ротора был зафиксирован всплеск вибрации, и будет «ждать» проверки других признаков наличия данного дефекта – например, изменения уровня вибрации при прохождении критических частот (см. рис. 1). При подтверждении диагноза система сообщит пользователю о соответствующем предупреждении. Если же дефект не подтвердится, то она «забудет» про всплеск.

Алгоритм был отработан на реальных данных, которые позволили формализовать алгоритм, описанный в [2], [3].

Таким образом, система позволяет в автоматическом режиме выявлять и запоминать незначительные события – кратковременный всплеск вибрации (который эксплуатационный персонал может пропустить) и изменение вибрации на опорах ротора при прохождении критических частот (не очень много примеров, когда на станции ведется систематический анализ изменения вибрации на критических частотах относительно некоторого «базового» уровня).

Невыявленный вылет малоразмерной лопатки, как правило, неопасен с точки зрения надежности оборудования – турбоагрегат может доработать до планового ремонта с низкими уровнями вибрации на опорах, но после вскрытия цилиндра потребует оперативного поиска комплекта рабочих лопаток поврежденной ступени и дополнительных затрат времени на переоблапачивание ротора. При этом в текущих реалиях рынка завод-изготовитель, как правило, не готов к мгновенному восполнению необходимых запасных частей. Отсюда однозначно прослеживается важность подобной системы не только для эксплуатационного персонала, но и для производителя. Такая основа помогает ему заблаговременно формировать заказы на производство, пополнять склад необходимыми запасными частями и быть готовым к нештатным ситуациям, происходящим на используемом оборудовании.

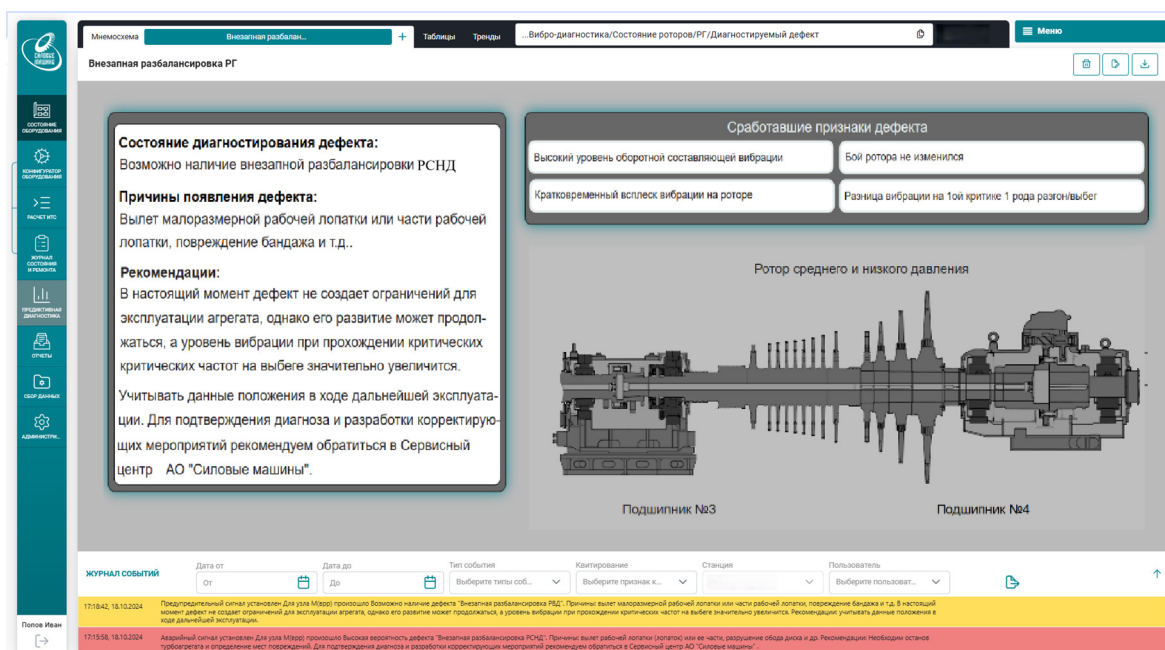


Рис. 1. Окно диагностирования дефекта «Внезапная расцентровка» в ПО АтласСМ (АО «Силовые машины»)  
Fig. 1. Defect diagnostic window «sudden misalignment» in the AtlasSM software (JSC «Power Machines»)

Второй пример наглядно показывает важность оперативного обнаружения дефекта с целью предотвращения развития вторичных повреждений агрегата.

Апробация алгоритмов работы системы была проведена еще на одном реальном примере – на результатах пусков мощного конденсационного турбоагрегата при выходе его из капитального ремонта (рис. 2 и 3).

Делались три попытки запуска агрегата без принятия каких-либо мер для устранения причин повышенной вибрации. При этом он останавливался по причине либо аварийного уровня вибрации (1-й пуск), либо увеличения значения боя ротора (2-й и 3-й пуски).

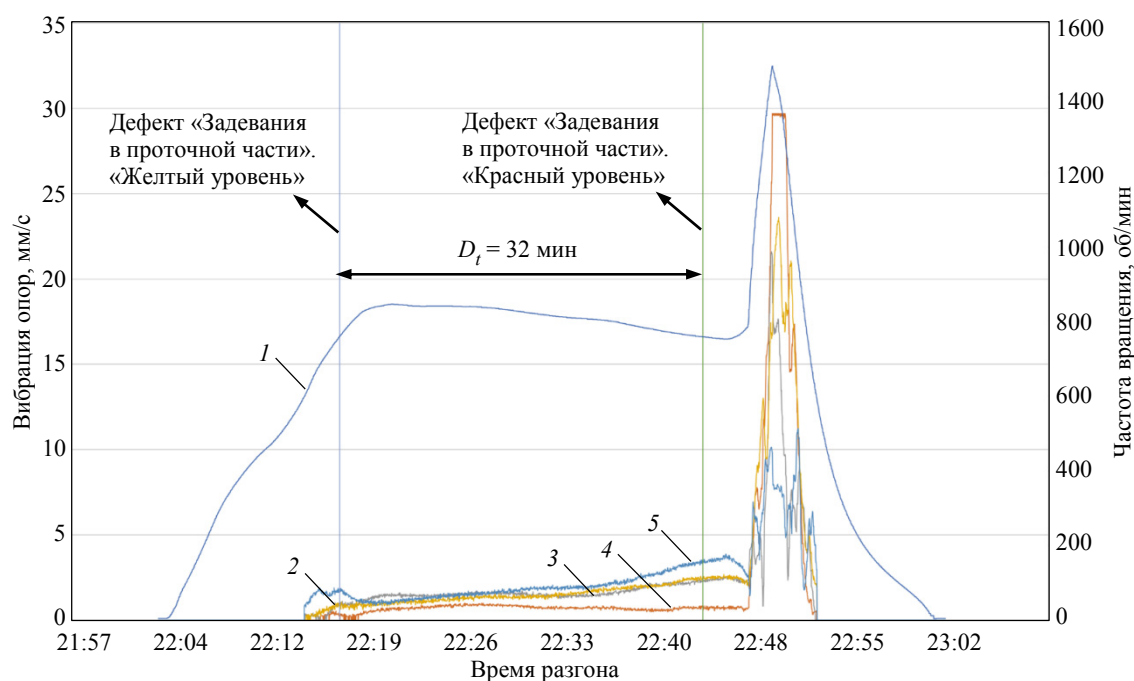
Отсутствие в данном случае системы мониторинга и диагностики, применяемой на энергетическом оборудовании, и, соответственно, принятия необходимых мер для локализации неизвестного дефекта и его последующего устранения привело к тяжелым последствиям, которых можно было бы избежать при наличии системы, а именно к повреждению уплотнений проточной части, разбитым

колодкам опорных вкладышей, «колена» на муфте, а также значительная расцентровка.

При этом, как показала имитация, в ходе всех трех пусков система «Конкорд» уверенно диагностировала бы дефект «задевания в проточной части», что позволило бы обнаружить дефект на раннем этапе, провести анализ ситуации, внести коррективы в пусковые режимы и избежать повторного ремонта.

**Выводы и заключение.** Подводя итоги и пытаясь обосновать эффективность или пользу от внедрения автоматизированной системы диагностирования турбоагрегатов, необходимо ответить на один вопрос.

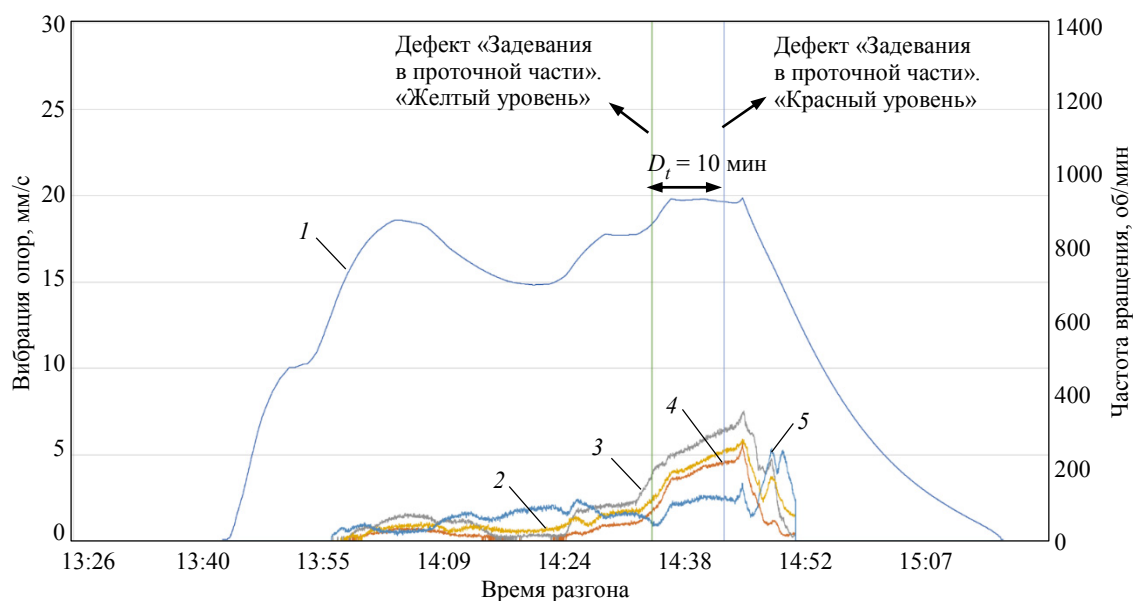
Когда начинается работа специалиста по вибрации на электростанции? Как правило, когда уровень вибрации достигает 4.5 мм/с, т. е. в момент, когда тот или иной дефект уже достаточно развит и уже существует некоторое регламентированное время для принятия мер по его устранению. Однако идентификация этого дефекта в общем случае требует как минимум анализа архива



- 1 – частота вращения  $n$ , об/мин;  
 2 – 5В (вибрация на опоре № 5 в вертикальном направлении);  
 3 – 4П (вибрация на опоре № 4 в поперечном направлении);  
 4 – 4В (вибрация на опоре № 4 в вертикальном направлении);  
 5 – 5П (вибрация на опоре № 5 в поперечном направлении);  
 $D_t$  – время на принятие решения персоналом о необходимых корректировках до проявления фатальных последствий дефекта

Рис. 2. Тренды вибрации опор и частоты вращения агрегата во время пусковых операций (представлен 1-й пуск из трех) 28.05.2024

Fig. 2. Trends in vibration of supports and rotation frequency of the unit during start-up operations (1 start-up out of three are presented) 28.05.2024



1 – частота вращения  $n$ , об/мин;  
2 – 5В (вибрация на опоре № 5 в вертикальном направлении);  
3 – 4П (вибрация на опоре № 4 в поперечном направлении);  
4 – 4В (вибрация на опоре № 4 в вертикальном направлении);  
5 – 5П (вибрация на опоре № 5 в поперечном направлении);  
 $D_t$  – время на принятие решения персоналом о необходимых корректировках до проявления фатальных последствий дефекта

Рис. 3. Тренды вибрации опор и частоты вращения агрегата во время пусковых операций (представлен 2-й пуск из трех) 29.05.2024

Fig. 3. Trends in vibration of supports and rotation frequency of the unit during start-up operations (2 start-up out of three are presented) 29.05.2024

замеров (при их наличии) или непосредственно проведения замеров на нескольких режимах или даже специальных испытаний. При этом, как было показано, в ходе эксплуатации агрегатов возможны события, критичные с точки зрения диагностирования дефекта, но на которые персонал зачастую не обращает внимания.

Ситуация еще более усугубляется, если на электростанции нет специалиста по вибрации, т. е. его необходимо найти, пригласить, заключить договор и т. д.

В случае автоматизированной системы диагностики все возможные ситуации, зависимости параметров и прочие события фиксируются при любом уровне исходной вибрации и при необходимости выводятся пользователю как соответствующий признак некоторого дефекта (дефектов).

Данная система в режиме реального времени подскажет особенности поведения агрегата, укажет на вероятные диагнозы (дефекты) и возможные пути решения проблемы, и задача заказчика с учетом опыта эксплуатации и проведенного ремонта и т. д. уточнить диагноз и проработать меры его устранения.

В настоящий момент уже ведутся работы над вторым поколением системы, которая будет характеризоваться переходом на систему рассуждений, построенную на принципах нечеткой логики, возможностью интеграции ремонтной документации, наличием прогностического блока, архивом замеров, наличием модуля поддержки балансировочных работ.

### Список литературы

1. Урьев Е. В., Мурманский Б. Е., Бродов Ю. М. Концепция системы вибрационной диагностики паровой турбины // Теплоэнергетика. 1995. № 4. С. 36–40.
2. Кравчук В. В., Урьев Е. В. Некоторые особенности диагностики вылета лопаток, расположенных в

средней части ротора // Электрические станции. 2003. № 9. С. 11–14.

3. Кшесинский Д. С., Деминов А. М., Урьев Е. В. Диагностика разрушения малоразмерных рабочих лопаток турбины // Электрические станции. 2015. № 10. С. 43–48.

### Информация об авторах

**Карелин Владислав Сергеевич** – аспирант кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: karelinvld@gmail.com

**Соколов Петр Владимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: petr\_sokolov\_resume@mail.ru

**Кистойчев Александр Владимирович** – канд. техн. наук, главный специалист, АО «Силовые машины», ул. Ватутина, д. 3, лит. А, Санкт-Петербург, 195009, Россия.

E-mail: Kistoychev\_AV@power-m.ru

**Красносельцев Олег Владимирович** – эксперт по вибродиагностике энергетического оборудования, АО «Силовые машины», ул. Ватутина, д. 3, лит. А, Санкт-Петербург, 195009, Россия.

E-mail: Krasnoseltsev\_OV@power-m.ru

**Попов Артем Викторович** – главный специалист, АО «Силовые машины», ул. Ватутина, д. 3, лит. А, Санкт-Петербург, 195009, Россия.

E-mail: Popov\_AV1@power-m.ru

#### Вклад авторов:

Карелин В. С. – общее руководство, формирование концепции системы, реализация программного обеспечения.

Соколов П. В. – общее руководство, рецензирование.

Кистойчев А. В. – формирование концепции системы, формирование требований к системе.

Красносельцев О. В. – валидация разработанных алгоритмов на экспериментальных данных.

Попов А. В. – валидация разработанных алгоритмов на экспериментальных данных.

### References

1. Ur'ev E. V., Murmanskij B. E., Brodov Ju. M. Konceptija sistemy vibracionnoj diagnostiki parovoj turbiny // Teploenergetika. 1995. № 4. S. 36–40. (In Russ.).

2. Kravchuk V. V., Ur'ev E. V. Nekotorye osobennosti diagnostiki vyleta lopatok, raspolozhennyh v srednej chasti

rotora // Jelektricheskie stancii. 2003. № 9. S. 11–14. (In Russ.).

3. Kshesinskij D. S., Deminov A. M., Ur'ev E. V. Diagnostika razrushenija malorazmernyh rabochih lopatok turbiny // Jelektricheskie stancii. 2015. № 10. S. 43–48. (In Russ.).

### Information about the authors

**Vladislav S. Karelin** – postgraduate student, Department of Automatic Control Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: karelinvld@gmail.com

**Petr V. Sokolov** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automatic Control Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: petr\_sokolov\_resume@mail.ru

**Aleksandr V. Kistoychev** – Cand. Sci. (Eng.), Chief Specialist, JSC «Power Machines», 3, Vatutina St., lit. A, Saint Petersburg, 195009, Russia.

E-mail: Kistoychev\_AV@power-m.ru

**Oleg V. Krasnosel'tsev** – Expert in vibration diagnostics of power equipment, JSC «Power Machines», 3, Vatutina St., lit. A, Saint Petersburg, 195009, Russia.

E-mail: Krasnoseltsev\_OV@power-m.ru

**Artem V. Popov** – Chief Specialist, JSC «Power Machines», 3, Vatutina St., lit. A, Saint Petersburg, 195009, Russia.

E-mail: Popov\_AV1@power-m.ru

**Author contribution statement:**

Karelin V. S. – general management, system concept, software delivery.

Sokolov P. V. – general management, review.

Kistoychev A. V. – system concept, system requirements.

Krasnosel'tsev O. V. – validation of the developed algorithms on experimental data.

Popov A. V. – validation of the developed algorithms on experimental data.

Статья поступила в редакцию 11.03.2025; принята к публикации после рецензирования 26.03.2025; опубликована онлайн 26.05.2025.

Submitted 11.03.2025; accepted 26.03.2025; published online 26.05.2025.

---