

*Пономарев Максим Сергеевич,
студент, 4 курс, Институт цифровых интеллектуальных систем,
направления подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических
процессов и производств»
ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»*

Россия, г. Москва

*Кищенко Роман Валерьевич,
студент, 4 курс, Институт цифровых интеллектуальных систем,
направления подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических
процессов и производств»
ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»*

Россия, г. Москва

*Федорова Ульяна Сергеевна,
студентка, 4 курс, Институт цифровых интеллектуальных систем,
направления подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических
процессов и производств»
ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»*

Россия, г. Москва

ПРЕДИКТИВНАЯ ДИАГНОСТИКА ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДАННЫХ

Аннотация: В статье предложен подход к построению системы предиктивной диагностики промышленного оборудования на основе данных АСУ ТП и специализированных датчиков. Цель исследования - определить последовательность сбора, подготовки и анализа информации, обеспечивающую раннее выявление деградации и обоснованное планирование ремонта. Используются методы системного анализа и структурно-

функционального моделирования. Предложен интегральный показатель риска, объединяющий нормированные отклонения параметров, скорость изменения и устойчивость диагностических признаков. Рассмотрены требования к интеграции аналитического модуля со SCADA-, MES- и системами управления ТОиР. Установлено, что эффективность решения зависит от качества данных, правильного выбора критического оборудования, интерпретируемости предупреждений и наличия регламента действий персонала.

Ключевые слова: предиктивная диагностика, промышленное оборудование, анализ данных, техническое состояние, прогнозирование отказов, остаточный ресурс, АСУ ТП, машинное обучение.

Annotation: The article proposes an approach to building a predictive diagnostics system for industrial equipment using automated process control data and specialized sensors. The study determines a consistent procedure for data acquisition, preparation and analysis aimed at early degradation detection and maintenance planning. System analysis and structural-functional modeling are applied. An integral risk indicator combining normalized parameter deviations, rate of change and stability of diagnostic features is proposed. Requirements for integration with SCADA, MES and maintenance management systems are considered. The effectiveness of predictive diagnostics is shown to depend on data quality, proper selection of critical equipment, interpretability of warnings and established personnel response procedures.

Key words: predictive diagnostics, industrial equipment, data analysis, condition monitoring, failure prediction, remaining useful life, automated process control system, machine learning.

Принципы организации системы. Внедрение следует начинать с анализа критичности оборудования и последствий отказа. ГОСТ Р ИСО 17359-2015 предусматривает определение функций объекта, возможных отказов,

контролируемых параметров и базового уровня исправного состояния [3]. Приоритет получают агрегаты, остановка которых ограничивает производительность, создает риск аварии или требует длительного восстановления.

Предиктивная система отличается от обычной пороговой сигнализации анализом динамики. Параметр может оставаться допустимым, но устойчивый тренд уже свидетельствует об ухудшении состояния. Поэтому используются не только текущие значения, но и скорость изменения, спектральные составляющие, взаимосвязь с нагрузкой и повторяемость отклонений. Результатом является предупреждение с указанием вероятного дефекта, уровня риска и рекомендуемого срока проверки; окончательное решение принимается по утвержденному регламенту ТОиР.

Формирование и подготовка данных. Источниками служат штатные сигналы АСУ ТП - температура, давление, расход, ток, мощность, частота вращения - и дополнительные вибрационные, акустические или тепловые датчики. Архитектура должна обеспечивать единое описание источников, синхронизацию времени и хранение истории [4]. Установка большого количества измерителей не является самоцелью: каждый канал выбирается по связи с механизмом отказа. Основные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Диагностические данные и направления их обработки

Параметр	Источник	Ранний признак	Возможный дефект	Обработка
Вибрация	Акселерометр	Рост СКЗ, новые частоты, импульсы	Дисбаланс, расцентровка, износ подшипника	Спектр, огибающая, тренд
Температура	Термопара, тепловизор	Рост при сопоставимой нагрузке	Недостаток смазки, перегрузка, охлаждение	Тренд, регрессия, темп изменения
Ток, мощность	Датчик тока, привод	Асимметрия, гармоники, рост потребления	Повреждение обмотки, перегрузка, заклинивание	Токовый анализ, модель нагрузки
Давление, расход	Датчик, расходомер	Пульсации, падение производительности	Утечка, засорение, кавитация, износ	Корреляция, баланс, тренд

Параметр	Источник	Ранний признак	Возможный дефект	Обработка
Акустика, масло	УЗ-датчик, анализатор масла	Импульсы, частицы износа, изменение вязкости	Трение, микрповреждение, деградация смазки	Классификация, лабораторный анализ

Подготовка включает синхронизацию рядов, удаление дублей, маркировку пропусков, проверку физических диапазонов и нормирование относительно исправного состояния конкретной машины. Затем данные разделяются на окна наблюдения и преобразуются в признаки. Необходимо учитывать пуски, остановки, изменение нагрузки и ремонтные вмешательства, иначе модель будет принимать штатные переходные процессы за дефекты.

Для обучения важна достоверная история ТОиР. Запись о ремонте должна содержать подтвержденную неисправность, замененный элемент и результат осмотра. При недостатке размеченных отказов целесообразно сначала применять обнаружение аномалий на данных нормальной эксплуатации, а классификацию конкретных дефектов вводить по мере накопления подтвержденных случаев.

Оценка риска и прогнозирование. Для сопоставления разнородных признаков рассчитывается нормированное отклонение:

$$z_i(t) = [x_i(t) - m_i] / s_i,$$

где $x_i(t)$ — текущее значение, m_i — базовый уровень, s_i — масштаб разброса в исправном состоянии. Для данных с выбросами предпочтительны медиана и робастная оценка разброса. Интегральный риск определяется как:

$$R(t) = \sum w_i \cdot q_i(t), \quad \sum w_i = 1,$$

где $q_i(t)$ учитывает отклонение, тренд и диагностическую уверенность, а w_i отражает связь признака с отказом и критичность узла. Значение $R(t)$ переводится в состояния «норма», «наблюдение», «предаварийное» и «аварийное». Для исключения ложных тревог учитывается длительность отклонения, а не единичный выброс.

Выбор метода зависит от данных. Экспертные правила применимы при понятных физических зависимостях; классификация — при наличии размеченных дефектов; обнаружение аномалий — при преобладании нормальных наблюдений; регрессия и временные ряды — для прогноза момента достижения предельного уровня. Требования к интерпретации диагностической информации установлены ГОСТ Р ИСО 13379-1-2015 [5]. Наиболее надежна гибридная модель, объединяющая физические ограничения, статистические признаки и машинное обучение.

Прогноз остаточного ресурса следует представлять интервалом, поскольку будущая нагрузка неизвестна. Практически полезно временное окно, в котором требуется обследование или ремонт. Российские исследования отмечают, что точность ограничивают пропуски, несогласованность архивов и попытки внедрить машинное обучение до создания устойчивой инфраструктуры сбора данных [7].

Интеграция с АСУ ТП и ТОиР. На нижнем уровне датчики и контроллеры формируют сигналы; SCADA обеспечивает визуализацию и архив; хранилище временных рядов объединяет их с журналами ремонтов и нагрузок; аналитический сервис рассчитывает риск; система ТОиР создает уведомление или заявку. Быстрые вибрационные сигналы могут предварительно обрабатываться на периферийном устройстве, а в центральное хранилище передаются признаки и диагностические события.

Цифровой двойник позволяет сравнивать фактическое значение с ожидаемым для конкретной нагрузки, а не с постоянным порогом. Интеллектуальные информационно-измерительные системы на основе цифровых двойников рассматриваются как средство объединения мониторинга, оценки ресурса и прогнозирования отказов [8]. Ввод системы рекомендуется выполнять в консультативном режиме: специалист подтверждает предупреждение, а результат проверки возвращается в базу.

Команды безопасности должны оставаться в детерминированном контуре АСУ ТП.

Условия внедрения и результативность. Пилотный проект целесообразно проводить на одном критическом типе оборудования. Оцениваются доля подтвержденных предупреждений, ложные тревоги, время упреждения, точность определения дефекта и сокращение простоя. Экономический эффект рассчитывается как разность предотвращенных потерь и затрат на датчики, хранение, разработку, интеграцию и сопровождение. Решение о масштабировании принимается после проверки ценности пилота и готовности процессов ТОиР [9].

Для опасных производств учитываются последствия для безопасности. ГОСТ Р 53563-2009 устанавливает принципы комплексного мониторинга, диагностирования и прогнозирования ресурса [6]. Важен и жизненный цикл модели: после ремонта, замены датчика или изменения режима требуется повторная настройка базового состояния. Предиктивная диагностика дает результат только в замкнутом контуре «сигнал - анализ - инженерное решение - действие - подтверждение фактического дефекта».

Предложенная модель объединяет выбор критического оборудования, подготовку данных, расчет интегрального риска, прогнозирование и передачу рекомендаций в систему ТОиР. Ее применение позволяет перейти от регистрации превышений к раннему обнаружению устойчивой деградации и планированию обслуживания по фактическому состоянию.

Практический эффект определяется не только алгоритмом, но и диагностической обоснованностью датчиков, прослеживаемостью данных, интерпретируемостью предупреждений и регламентом действий. Перспективой является апробация подхода на вращательном оборудовании с оценкой времени упреждения, вероятности пропуска отказа и доли ложных предупреждений.

Использованные источники:

1. ГОСТ Р 72328-2025. Цифровая станкоинструментальная промышленность. Мониторинг технологического оборудования. Предиктивная диагностика. Общие положения. — Введ. 01.01.2026. — М.: Российский институт стандартизации, 2025. — 12 с.
2. ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. — Введ. 01.01.2022. — М.: Российский институт стандартизации, 2021.
3. ГОСТ Р ИСО 17359-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Общее руководство. — Введ. 01.12.2016. — М.: Стандартиформ, 2016.
4. ГОСТ Р ИСО 13374-1-2011. Контроль состояния и диагностика машин. Обработка, передача и представление данных. Часть 1. Общее руководство. — Введ. 01.12.2012. — М.: Стандартиформ, 2012.
5. ГОСТ Р ИСО 13379-1-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Методы интерпретации данных и диагностирования. Часть 1. Общее руководство. — Введ. 01.12.2016. — М.: Стандартиформ, 2016.
6. ГОСТ Р 53563-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Порядок организации. — Введ. 01.01.2011. — М.: Стандартиформ, 2010.
7. Ершов А. Н. Актуальные проблемы развития предиктивной аналитики в промышленности // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. — 2025. — Т. 23, № 3. — С. 187–194. — DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-187-194.
8. Звягин Л. С. Интеллектуальные информационно-измерительные системы на основе цифровых двойников для предиктивного обслуживания промышленного оборудования // Computational Nanotechnology. — 2025. — Т. 12, № 4. — С. 51–60. — DOI: 10.33693/2313-223X-2025-12-4-51-60.
9. Яковлева М. В., Шалина А. И. Алгоритм принятия решений о внедрении предиктивного обслуживания оборудования на

высокотехнологичных предприятиях // Вопросы инновационной экономики.
— 2023. — Т. 13, № 1. — С. 159–172. — DOI: 10.18334/vines.13.1.117426.