

ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ В ЦИФРОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

ORGANIZATIONAL ASPECTS OF PREDICTING EQUIPMENT FAILURES TO ENSURE PRODUCT QUALITY IN DIGITAL MANUFACTURING

Чиж Д.В., аспирант кафедры логистики и управления ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (Казань, Россия)

Лысенков А.И., аспирант кафедры логистики и управления ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (Казань, Россия)

В эпоху цифровизации производственных процессов ключевым условием выпуска конкурентоспособной продукции становится не просто контроль качества готовых изделий, а предупреждение возникновения дефектов, что напрямую зависит от возможности прогнозирования технического состояния оборудования. В этой связи развитие подходов к оценке влияния прогнозируемых отказов оборудования на ключевые показатели качества продукции видится как важная научная и практическая задача для современных промышленных предприятий. В статье исследуются методы регрессионного анализа, машинного обучения и байесовского оценивания для преобразования разнородных диагностических данных в прогноз остаточного ресурса и вероятности отказа оборудования для установления статистической зависимости с риском возникновения брака. Предложен порядок процедуры предупреждения брака на основе зависимости между износом оборудования и качеством изделия на примере производства блока цилиндров из алюминия для двигателей внутреннего сгорания, имеющий контур цикла «диагностика – прогноз – обслуживание – контроль». Практической реализацией предложенного подхода является установление зависимости овальности отверстия блока цилиндра от уровня вибрации подшипника по зонам развития дефекта на основе обучения модели регрессии предсказывать остаточный ресурс времени до критического порога изделия с браком.

Ключевые слова: качество продукции, предиктивная аналитика, отказы оборудования, техническое обслуживание и ремонт, производственная система, машинное обучение, цифровое производство.

Для цитирования: Чиж Д.В., Лысенков А.И. Организационные аспекты прогнозирования отказов оборудования для целей обеспечения качества продукции в цифровом производстве // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2026. № 2(89). С. 68–72.

Chizh D.V., graduate student at the Department of Logistics and Management, Kazan National Research Technological University (Kazan, Russia)

Lysenkov A.I., graduate student at the Department of Logistics and Management, Kazan National Research Technological University (Kazan, Russia)

In the era of digitalization of production processes, the key condition for manufacturing competitive products is not just the quality control of finished goods, but the prevention of defects, which directly depends on the ability to predict the technical condition of equipment. In this regard, the development of approaches to assessing the impact of predicted equipment failures on key product quality indicators is seen as an important scientific and practical task for modern industrial enterprises. The article explores methods of regression analysis, machine learning, and Bayesian estimation to transform heterogeneous diagnostic data into a prediction of residual useful life and the probability of equipment failure in order to establish a statistical relationship with the risk of defects. A procedure for defect prevention based on the relationship between equipment wear and product quality is proposed, using the example of the production of aluminum cylinder blocks for internal combustion engines, which follows a closed loop of «diagnostics – prediction – maintenance – quality control». The practical implementation of the proposed approach involves establishing the dependence of the cylinder bore ovality on the bearing vibration level according to the stages of defect development, based on training a regression model to predict the residual time until the critical threshold for a defective product is reached.

Keywords: product quality, predictive analytics, equipment failures, maintenance and repair, production system, machine learning, digital manufacturing.

For citation: Chizh D.V., Lysenkov A.I. Organizational aspects of predicting equipment failures to ensure product quality in digital manufacturing. Information-economic aspects of standardisation and technical regulation. 2026; 2(89): 68–72. (In Russ.).

ВВЕДЕНИЕ

В условиях цифровой трансформации производственных систем проблема обеспечения стабильности качества продукции приобретает новое измерение. Традиционные методы статистического контроля качества, ориентированные на обнаружение брака на выходе, уступают место предиктивным моделям, интегрированным в контур управления технологическими процессами. Одним из критических факторов, дестабилизирующих качество, является техническое состояние оборудования: его деградация, износ и внезапные отказы приводят к сбою настроек, нарушению режимов обработки и, как следствие, к появлению систематических дефектов.

Актуальность данного исследования определяется необходимостью развития научно-методического аппарата, позволяющего количественно оценить влияние прогнозируемых отказов оборудования на ключевые показатели качества продукции и интегрировать эти оценки в общую систему управления качеством на предприятии. Решение данной задачи соответствует вектору развития методов обеспечения качества на всех этапах жизненного цикла изделия и создает основу для построения адаптивных, самонастраивающихся производственных систем.

Исследованиям в области прогнозирования отказов оборудования как фактора обеспечения качества продукции посвящено множество трудов. Вклад в развитие теории надежности оборудования и влияния отказов на качество продукции внесли Гусев Е.В. и Пронкин А.А. [1], Лыкасов П.В. и соавторы исследовали методы прогнозирования состояния оборудования для целей разработки автоматизированной системы технического обслуживания и ремонта (далее – ТОиР [2], в том числе, Андронов А.Н. и Бадокин Т.Е. изучили перспективы использования методов машинного обучения, нейросетевого моделирования [3].

Отдельное направление составляют исследования, посвященные проблемам внедрения предиктивной аналитики в российских реалиях. Брюхова А.А. и Костюнина Т.Н. провели анализ барьеров цифровизации, включая отсутствие системного подхода, трудности с предиктивной технической диагностикой и завышенные ожидания от готовых решений [4], Ершов А.Н. предложил архитектурные решения на основе туманных и граничных вычислений, адаптированные к условиям российских промышленных предприятий [5]. Вопросы совершенствования системы управления качеством продукции на основе математической статистики и цифровых технологий представлены в статьях Малышевой Т.В. [6], применения российских цифровых систем управления качеством с использованием возможностей искусственного интеллекта и их интеграции с CAQ-системами – в публикациях Метревели И.С. [7].

Цель статьи заключается в исследовании и систематизации организационных подходов к интеграции методов прогнозирования технического состояния оборудования в контур управления качеством продукции для своевременного предупреждения дефектов.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРЕДУПРЕЖДЕНИЮ ДЕФЕКТОВ

Прогнозирование отказов оборудования представляет собой процесс перехода от планово-предупредительных ремонтов к ремонту «по состоянию». Это напрямую влияет на качество продукции, так как неисправное оборудование является главным источником брака. В основе такого перехода лежит математический аппарат, преобразующий поток данных с сенсоров в количественные оценки надежности.

Методы регрессионного анализа и теории временных рядов (экспоненциальное сглаживание) позволяют моделировать тренды деградации параметров, в то время как алгоритмы машинного обучения, такие как ансамбли случайного леса или градиентный бустинг, классифицируют предаварийные состояния по спектральным характеристикам вибрации и тепловым сигналам. Байесовские подходы и скрытые марковские модели дают возможность не только детектировать отклонения от параметров работы оборудования, но и вычислять остаточный ресурс с оценкой вероятности отказа на заданном горизонте планирования, превращая разрозненные показания датчиков в математически обоснованный прогноз [8].

На рис. 1 представлена организационная схема количественной оценки данной зависимости на примере производства блока цилиндров из алюминия для двигателей внутреннего сгорания для изделий машиностроения.

Износ подшипников или нарушение его балансировки приводит к биению инструмента, что вызывает овальность при точении или разбивку отверстия при фрезеровании, в результате возникает до 12% брака на высоких вибрациях [9].

Процедура организована в пять последовательных этапов таким образом, чтобы замкнуть «петлю качества»: от сбора данных с подшипника до предотвращения брака блока цилиндров. Ключевая задача первого этапа заключается в установлении математической взаимосвязи уровня вибрации подшипника (X) с ожидаемой величиной овальности (Y) для определения критического параметра мониторинга. Ограничения по уровню вибрации регламентированы ГОСТ 34905.4–2022 [10]. Зависимость между параметрами имеет вид уравнения линейной регрессии: $y=3,5415x-6,7976$ (рис. 2).

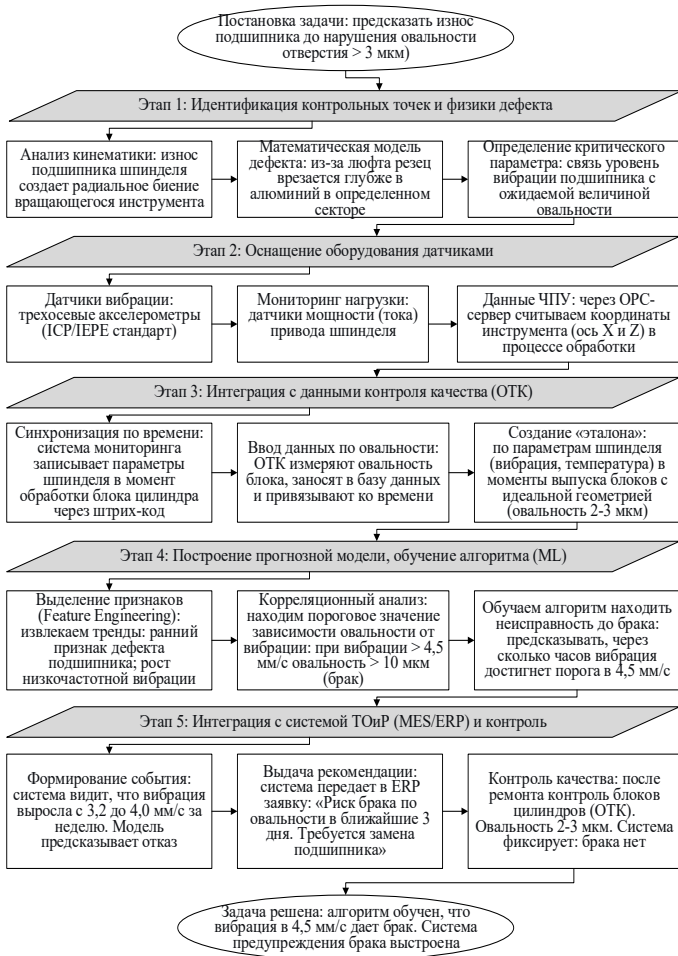


Рис. 1. Последовательность этапов предупреждения брака на примере выстраивания зависимости между износом оборудования и качеством изделия

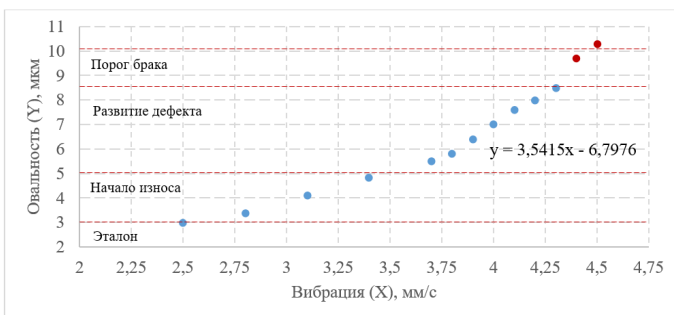


Рис. 2. Зависимость уровня вибрации подшипника (X) и овальности отверстия блока цилиндра (Y)

На втором шаге подшипник оснащается системой мониторинга, выполняется подключение к системе ЧПУ для отслеживания фактических координат инструмента, чтобы визуализировать возможное затягивание резца из-за люфта. Самый важный шаг для привязки прогнозов к качеству – это синхронизация данных мониторинга с результатами измерений ОТК (3 этап). Координатно-измерительная машина заносит в базу фактическую овальность каждого блока цилиндра и привязывает ее к временному штампу производства для создания «эталона» изделия с идеальной геометрией. В таблице представлены замеры по мере износа подшипника и эталонные значения после замены узла.

На втором шаге подшипник оснащается системой мониторинга, выполняется подключение к системе ЧПУ для отслеживания фактических координат инструмента, чтобы визуализировать возможное затягивание резца из-за люфта. Самый важный шаг для привязки прогнозов к качеству – это синхронизация данных мониторинга с результатами измерений ОТК (3 этап). Координатно-измерительная машина заносит в базу фактическую овальность каждого блока цилиндра и привязывает ее к временному штампу производства для создания «эталона» изделия с идеальной геометрией. В таблице представлены замеры по мере износа подшипника и эталонные значения после замены узла.

На четвертом шаге путем выделения признаков из сигнала вибрации извлекаются тренды и строится корреляционная зависимость овальности блока от уровня вибрации. Это позволяет найти пороговое значение; например, при вибрации более 4,5 мм/с овальность стабильно превышает допуск и составляет 10 мкм. Далее, модель регрессии обучается предсказывать остаточный ресурс времени, через которое вибрация достигнет критического порога и допустит выпуск изделия с браком.

Заключительный пятый этап интегрирует прогноз с производственной системой планирования для подачи в ERP-систему заявки на ремонт и предотвращения брака. Процедура завершается интеграцией полученных прогнозных данных с ТОиР оборудования, где после замены подшипника система валидирует его эффективность: вибрация должна снизиться до эталонных значений, а овальность обработанных блоков вернуться в нормативное значение.

Представленный порядок внедрения системы прогнозирования отказов демонстрирует фундаментальный сдвиг парадигмы в организации производства: переход от реактивного обслуживания к проактивному управлению ка-

Этапы состояния оборудования и его влияние на овальность отверстия блока цилиндра

Этап	Состояние оборудования	Вибрация (X), мм/с	Овальность (Y), мкм	Примечание
1	Норма (Эталон)	2,5	3,0	Базовый уровень
2	Начало износа	3,8	5,2	Данные с сенсоров
3	Развитие дефекта	4,0	7,0	Данные с сенсоров
4	Критический уровень	4,2	9,5	Данные с сенсоров
5	Порог брака (расчетный)	4,5	10,0	Требуется останов
6	Норма (Эталон)	2,5	3,0	После ремонта (базовый уровень)

чеством на основе данных. Результаты количественного анализа связи вибрации подшипника (4,5 мм/с) и овальности блока (10 мкм), превращают показания датчиков в измеримый прогноз остаточного ресурса оборудования. Критическим фактором выступает интеграция разнородных информационных потоков – данных мониторинга состояния оборудования в реальном времени и результатов измерений координатно-измерительной машины, что позволяет фиксировать отклонения, определять пороговые значения, при которых технологический процесс выходит за границы поля допуска.

Практическая ценность организации ТОиР раскрывается в интеграции работы производственной системы планирования (ERP/MES) с фактическими результатами ремонта. Система формирует предиктивную заявку на замену подшипника до момента возникновения брака и валидирует эффективность проведенных работ через повторный замер эталонных параметров. Такой подход создает самообучающийся контур управления качеством, где каждый цикл «диагностика – прогноз – обслуживание – контроль» вносит в модель новые данные, повышая точность последующих прогнозов и минимизируя риск выпуска несоответствующей продукции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило получить следующие научно-практические результаты в области прогнозирования отказов оборудования для обеспечения качества продукции:

1. Представлен математический аппарат, объединяющий методы регрессионного анализа, машинного обучения и байесовского оценивания для преобразования разнородных диагностических данных в прогноз остаточного ресурса и вероятности отказа оборудования для установления статистической зависимости с риском возникновения брака.
2. Разработана организационная схема процедуры предупреждения брака на основе зависимости между износом оборудования и качеством изделия на примере производства блока цилиндров из алюминия для двигателей внутреннего сгорания, имеющих контур цикла «диагностика – прогноз – обслуживание – контроль».
3. Практической реализацией предложенного подхода является установление зависимости овальности отверстия блока цилиндра от уровня вибрации подшипника по зонам развития дефекта на основе обучения модели регрессии предсказывать остаточный ресурс времени до критического порога изделия с браком.

Список литературы

1. Гусев Е.В., Пронкин А.А. Оценка надежности аппаратуры с учетом характера отказов // Научно-технический вестник Поволжья. 2025. № 4. С. 43–46.
2. Лыкасов П.В. Лейзгольд К.А., Бочкарев С.В. Анализ методов прогнозирования отказов оборудования // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. 2022. Т. 1. С. 148–154.
3. Андронов А.Н., Бадюкина Т.Е. Методы анализа выживаемости в задаче прогнозирования выхода из строя оборудования промышленных предприятий // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Прикладная математика. 2025. № 2. С. 65–83.
4. Брюхова А.А., Костюнина Т.Н. Проблемы предиктивной диагностики и аналитики // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 7. С. 335–338.
5. 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.
6. Малышева Т.В., Лысенков А.И. Развитие системы управления качеством на основе предиктивной аналитики предупреждения рисков несоответствия продукции // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2024. Т. 26, № 2(118). С. 39–47.
7. Метревели И.С. Обзор современного уровня применения российских цифровых систем управления качеством с использованием возможностей искусственного интеллекта // Петербургский экономический журнал. 2025. № 2. С. 18–31.
8. Горохова В.Ф., Магазев А.А., Касенов А.А., Титова Е.К. Непрерывные марковские модели кибератак для оценки времени до отказа безопасности // Динамика систем, механизмов и машин. 2024. Т. 12, № 1. С. 94–100.
9. Колганов К.А. Микрюков И.В., Марков А.С. Разработка технологии изготовления деталей/компонентов двигателя внутреннего сгорания с применением аддитивных методов производства // Силовое и энергетическое оборудование. Автономные системы. 2019. Т. 2, № 3. С. 166–184.
10. ГОСТ 34905.4–2022 Подшипники качения. Методы измерения вибрации. Часть 4. Цилиндрические подшипники. – М.: Российский институт стандартизации, 2023. – 16 с.

References

1. Gusev E.V., Pronkin A.A. Assessment of the reliability of equipment taking into account the nature of failures // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. 2025. No. 4. Pp. 43–46.
2. Lykasov P.V., Leizgold K.A., Bochkarev S.V. Analysis of methods for predicting equipment failures // Innovative Technologies: Theory, Tools, and Practice. 2022. Vol. 1. Pp. 148–154.
3. Andronov A.N., Badokina T.E. Methods of Survival Analysis in the Problem of Predicting Equipment Failure at Industrial Enterprises // Bulletin of Tver State University. Series: Applied Mathematics. 2025. No. 2. Pp. 65–83.
4. Bryukhova A.A., Kostyunina T.N. Problems of Predictive Diagnostics and Analytics // Izvestiya of Tula State University. Technical Sciences. 2023. No. 7. Pp. 335–338.
5. Ershov A.N. Actual Problems of Predictive Analytics Development in Industry // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova. 2025. Vol. 23. No. 3. Pp. 187–194.
6. Malysheva T.V., Lysenkov A.I. Development of a Quality Management System Based on Predictive Analytics for Preventing Product Non-Conformity Risks // Izvestiya of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2024. Vol. 26, No. 2(118). Pp. 39–47.
7. Metreveli I.S. Overview of the Current Level of Application of Russian Digital Quality Management Systems Using Artificial Intelligence Capabilities // Petersburg Economic Journal. 2025. No. 2. Pp. 18–31.
8. Gorokhova V.F., Magazev A.A., Kasenov A.A., Titova E.K. Continuous Markov Models of Cyberattacks for Estimating the Time to Security Failure // Dynamics of Systems, Mechanisms, and Machines. 2024. Vol. 12, No. 1. Pp. 94–100.
9. Kolganov K.A., Mikryukov I.V., Markov A.S. Development of the technology for manufacturing parts/components of an internal combustion engine using additive manufacturing methods // Power and Energy Equipment. Autonomous Systems. 2019. Vol. 2, No. 3. Pp. 166–184.
10. GOST 34905.4–2022 Rolling Bearings. Methods for Measuring Vibration. Part 4. Cylindrical Bearings. – M.: Russian Institute of Standardization, 2023. – 16 p.