

УДК 629.017

Концептуальная модель предиктивной аналитики с учетом логистических факторов

Крутов Тимофей Юрьевич

timofeykrutov@gmail.com

SPIN-код: 2731-1775

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрен подход к построению системы предиктивного обслуживания оборудования, основанной на интеграции сенсорной информации, базы статистики отказов и логистических факторов, определенных в стандарте DEF STAN. Предложена концептуальная модель обработки данных, которая позволяет учитывать не только технические параметры деградации элементов, но и особенности встроенных диагностических систем, контрольных точек и конструктивных средств защиты. Представленный подход обеспечивает более точное прогнозирование ресурса и вероятности отказа оборудования, что повышает уровень надежности и безопасности эксплуатации.

Ключевые слова: предиктивная аналитика ТОиР, сенсорные данные, логистические факторы, DEF STAN, надежность эксплуатации, эксплуатационная диагностика

Conceptual model of predictive analytics incorporating logistics factors

Krutov Timofey Yuryevich

timofeykrutov@gmail.com

SPIN-code: 2731-1775

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The article discusses an approach to developing a predictive maintenance system for equipment, based on the integration of sensor data, a failure statistics database, and logistical factors defined by the DEF STAN standard. A conceptual data processing model is proposed, which accounts not only for the technical parameters of component degradation but also for the features of embedded diagnostic systems, control points, and structural protection measures. The proposed approach enables more accurate forecasting of equipment lifetime and failure probability, thereby enhancing the reliability and safety of operation.

Keywords: predictive maintenance analytics, sensor data, logistics factors, DEF STAN, operational reliability, operational diagnostics

Введение. В последнее время предиктивное обслуживание (Predictive Maintenance, PdM) становится одним из ключевых направлений развития систем технического обслуживания и ремонта (ТОиР). В отличие от традиционного планово-предупредительного обслуживания, которое основывается на регламентных интервалах эксплуатации, PdM предполагает прогнозирование технического состояния объекта в режиме реального времени и принятие

решений о ремонте или замене компонентов на основе объективных данных. Такой подход позволяет минимизировать непредвиденные простои, повысить безопасность и снизить совокупные затраты жизненного цикла оборудования.

Основными источниками информации для комплекса мер предиктивной аналитики являются сенсорные системы, фиксирующие множество параметров изделия: вибрацию, температуру, давление, ток и др. [1]. Данные сенсоров формируют набор признаков, который подвергается обработке методами машинного обучения и искусственного интеллекта для прогнозирования множества ключевых показателей эксплуатации изделия.

Однако на практике одних только сенсорных данных недостаточно для принятия корректных решений [2–4]. Для практической внедряемости таких моделей прогнозирования необходим системный подход, который учитывает не только технические, но и ресурсно-логистические аспекты. Концепция интегрированной логистической поддержки (ИЛП) предоставляет комплекс мер сопровождения изделий на всех этапах его жизненного цикла: от проектирования и испытаний до эксплуатации и технического обслуживания. Концепция включает прогнозирование потребностей в материалах, комплектующих и запасных частях (МКЗ), оборудовании, обучении и квалификации персонала, подготовке конструкторской и эксплуатационной документации и логистике.

В работе [5] отмечается, что использование логистических факторов, выделенных из стандарта логистической поддержки DEF STANDART 00-60 позволит создавать эффективные цепи поставок материально-технического обеспечения. В то же время ряд логистических факторов, относящихся к надежности эксплуатируемого оборудования, оказывает непосредственное влияние на достоверность прогнозов и возможность своевременного проведения ремонтных мероприятий.

Таким образом, имеет место задача комплексной интеграции сенсорной информации предиктивной аналитики и ее методов с параметрами логистической поддержки. Включение логистических факторов в модели прогнозирования позволяет формировать более реалистичные оценки остаточного ресурса оборудования и увеличить вероятность заблаговременного технического обслуживания.

Цель статьи — разработка концептуальной модели предиктивного обслуживания, объединяющей сенсорные данные, статистику отказов и логистические факторы. Такая интеграция обеспечит комплексное описание состояния объекта, повысит достоверность прогнозов и сделает их применимыми в реальных эксплуатационных условиях.

Материалы и методы. Для построения модели системы предиктивного обслуживания используется совокупность трех источников данных. Первым источником выступает сенсорная информация, включающая эксплуатационные показатели: вибрации, скорости, давления, метеорологические показатели: температурные характеристики, данные о давлении, запыленности, влаге, а также информацию об ошибках в процессе работы и исключительные со-

бытия. Эти данные обеспечивают динамическое описание процессов эксплуатации изделия и его деградации, а также позволяют строить краткосрочные прогнозы.

Вторым источником является база данных статистики отказов, накопленная в процессе эксплуатации изделий. Она включает данные об интенсивности отказов, дате начала и окончания эксплуатации, общую наработку, информацию о типах отказов и условиях их возникновения. Использование статистических баз данных дает возможность уточнения поведения вероятностных моделей и корректировки оценки остаточного ресурса.

Третьим компонентом выступает группа логистических факторов, основанных на стандарте DEF STAN. Среди них нужно рассмотреть следующие [5]:

- f5-элементы и средства, обеспечивающие безопасность эксплуатации оборудования;

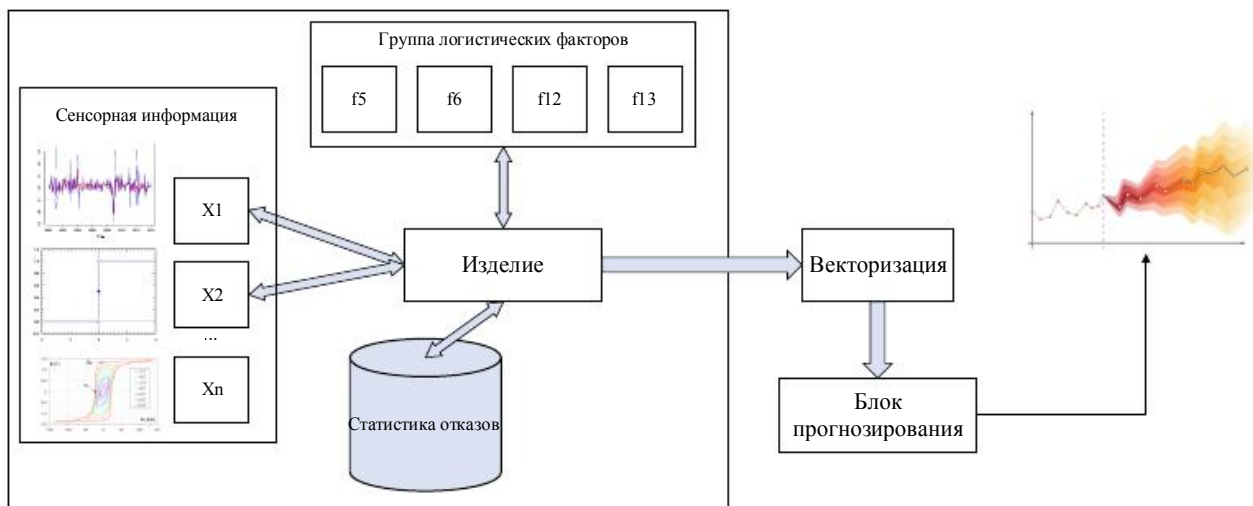
- f6-системы диагностики и мониторинга неисправностей и высокой степени износа МКЗ во всех элементах и узлах изделия;

- f12-контрольные точки — дополнительные методы и средства объективного контроля за состоянием узлов изделия, включающие применение алгоритмов машинного зрения;

- f13-конструктивные средства защиты от последствий отказов любого вида, включающие резервирование критически важных элементов изделия.

Выделенные логистические факторы в наибольшей степени влияют на надежность эксплуатации изделий и качество оценки остаточного ресурса. Предлагаемая концептуальная модель интеграции сенсорных данных, статистической информации и логистических факторов представлена на рисунке.

Модель системы предиктивного обслуживания в течение эксплуатационного периода получает сенсорную информацию с датчиков и формирует первичный набор признаков $x_1, x_2, \dots, x_n$. Далее совокупность данных подвергается обработке в блоке векторизации: сенсорные сигналы, логистические факторы и статистика отказов преобразуются в форматы данных, пригодные для обработки алгоритмами машинного обучения.



Концептуальная модель предиктивной аналитики ТОИР

На финальном этапе блок прогнозирования строит предсказания вероятности отказа и оставшегося ресурса. В отличие от традиционных подходов, прогноз учитывает не только изменяющиеся тренды сенсоров и статистическую информацию, но и факторы логистической поддержки.

Результаты. Концептуальная модель обеспечивает переход от сенсорного прогнозирования к интегрированному подходу, включение логистических факторов позволит формализовать учет критичности узлов и встроенных контрольных точек и конструктивных особенностей изделия. Включение информации о безопасности элементов и их значимости для эксплуатации дает возможность корректировать прогноз при выявлении отклонений. Наличие встроенных диагностических систем формирует дополнительный источник данных, информация которого усиливает сенсорную компоненту и позволяет более детально фиксировать скрытые стадии деградации. Контрольные точки выступают в качестве механизма верификации прогнозов, создавая возможность калибровки моделей на основании фактических измерений. Включение фактора избыточности конструкции, а именно наличия дополнительных элементов и защитных решений, снижает вероятность критической аварии, вследствие выхода из строя резервированного узла и компенсируют ошибки оператора. Такой подход позволяет учитывать не только техническое состояние объекта, но и конструктивную устойчивость системы к отказам и влиянию человеческого фактора. В результате интеграции всех перечисленных источников данных формируется вектор состояния изделия, поступающий в блок прогнозирования, где на его основе вычисляется остаточный ресурс и вероятность отказа. Это обеспечивает более полное описание работы оборудования и повышает точность прогноза по сравнению с методами, опирающимися исключительно на сенсорные измерения.

Обсуждение полученных результатов. Рассмотренная модель ориентирована не только на оценку вероятности отказа, но и на учет условий эксплуатации на протяжении всего жизненного цикла изделия. Использование логистических факторов дает возможность расширить представление о компонентах, выход из строя которых не всегда может быть предсказан исключительно по сенсорным данным. Дополнительную значимость приобретает механизм проверки наиболее уязвимых узлов посредством контрольных точек, что позволяет своевременно определять приоритетность ремонтных мероприятий. Встроенные системы диагностики повышают степень детализации анализа, а конструктивные решения, направленные на защиту и резервирование, усиливают устойчивость прогноза.

Важно подчеркнуть, что интеграция базы статистики отказов создает связку между индивидуальными особенностями конкретного изделия и типовыми закономерностями деградации, что формирует основу для адаптивности и способности модели к обучению на новых данных.

Заключение. Таким образом, концептуальная модель предиктивного обслуживания интегрирует сенсорные измерения, статистику отказов и логистические факторы DEF STAN, формируя основу для построения более

надежных прогнозов остаточного ресурса. В отличие от традиционных методов, ограниченных сенсорной информацией или статистическими закономерностями, предложенный подход учитывает критичность элементов, встроенные системы диагностики, контрольные точки и конструктивные средства защиты. Это делает прогнозирование более приближенным к реальным условиям эксплуатации.

Список источников

- [1] Benhanifia A. Systematic review of predictive maintenance practices in the manufacturing sector. *Intelligent Systems with Applications*, 2025, vol. 26, art. no. 200501. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2025.200501>
- [2] Митиогло А.М. Предиктивное обслуживание оборудования: зарубежный и отечественный опыт. *Молодой ученый*, 2021, № 25 (367). URL: <https://moluch.ru/archive/367/117940> (дата обращения 10.08.2025).
- [3] Nunes P., Santos J., Rocha E. Challenges in predictive maintenance — A review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2023, vol. 40, pp. 53–67. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.11.004>
- [4] Hakami A. Strategies for overcoming data scarcity, imbalance, and feature selection challenges in machine learning models for predictive maintenance. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, no. 1, art. no. 9645.
- [5] Сидельников И.Д., Барабушка А.С., Бром А.Е. Особенности конструкции и обслуживания техники как ключевые факторы логистики при создании цепей поставок в машиностроении. *Логистика и управление цепями поставок*, 2017, № 4, с. 33–40.