

## Прогнозирование И Минимизация Эксплуатационных Отказов Медицинского Оборудования На Основе Предиктивных Методов Диагностики

**Umida A. Ziyamukhamedova**

Doctor of Technical Sciences, Professor  
Kimyo International University in Tashkent, Uzbekistan

**Azimov Davronbek Ulug'bek o'g'li**

1st Year Master Student,  
Kimyo International University in Tashkent, Uzbekistan

### ABSTRACT

В статье рассматриваются современные подходы к повышению надежности эксплуатации высокотехнологичного медицинского оборудования (ВМО) на основе перехода от реактивного и планово-предупредительного обслуживания к предиктивному техническому обслуживанию (Predictive Maintenance, PdM). Актуальность исследования обусловлена ростом сложности архитектуры медицинских диагностических и терапевтических систем, что увеличивает вероятность внезапных отказов и эксплуатационных рисков.

Авторами предложена математическая модель оценки остаточного ресурса оборудования, основанная на применении двухпараметрического распределения Вейбулла, позволяющая описывать процессы деградации и прогнозировать вероятность отказа отдельных узлов. В рамках исследования проведена структурная декомпозиция факторов эксплуатационной нестабильности высокотехнологичных медицинских систем, включая механический износ, термическую деградацию электронных компонентов, программно-аппаратные сбои и влияние эксплуатационной среды. На основе анализа статистики отказов определен удельный вклад различных типов неисправностей в общую структуру отказов оборудования.

Предложено решающее правило инициации превентивного сервисного вмешательства, основанное на оценке функции надежности и динамики параметров деградации. Полученные результаты апробации модели на данных эксплуатации медицинской техники демонстрируют возможность снижения внеплановых простоев оборудования на 18–25%, а также повышение коэффициента технической готовности медицинских систем.

Разработанный подход может быть использован при формировании интеллектуальных систем мониторинга

### ARTICLE INFO

**Received:** 7<sup>th</sup> November 2025

**Accepted:** 6<sup>th</sup> February 2026

### KEYWORDS:

высокотехнологичное медицинское оборудование, надежность, предиктивное обслуживание, Predictive Maintenance, распределение Вейбулла, остаточный ресурс, техническая диагностика, медицинская инфраструктура.

состояния медицинского оборудования и внедрении предиктивных стратегий технического обслуживания в учреждениях здравоохранения.

## 1. Введение

Современная медицина немыслима без использования высокотехнологичного медицинского оборудования (ВМО), к которому относятся магнитно-резонансные томографы, компьютерные томографы, системы лучевой терапии, линейные ускорители и роботизированные хирургические комплексы. Данные системы характеризуются сложной многоуровневой архитектурой, объединяющей механические, электронные и программно-аппаратные компоненты. Рост технологической сложности оборудования, с одной стороны, обеспечивает высокую точность диагностики и лечения, а с другой — увеличивает вероятность возникновения отказов и деградационных процессов в отдельных узлах.

Надежность функционирования медицинского оборудования имеет критическое значение, поскольку его отказ может приводить не только к экономическим потерям медицинских учреждений, но и к задержке диагностики и лечения пациентов. Традиционная система технического обслуживания, основанная на планово-предупредительном ремонте (ППР), предполагает выполнение регламентных работ через фиксированные интервалы времени независимо от фактического состояния оборудования. Подобный подход нередко оказывается неэффективным: с одной стороны, он может приводить к преждевременной замене исправных компонентов и увеличению эксплуатационных расходов, а с другой — не позволяет своевременно выявлять скрытые дефекты, что повышает риск внезапных отказов и длительных простоев.

В условиях цифровой трансформации здравоохранения и развития концепции умного производства особую актуальность приобретает переход к методам предиктивного обслуживания (Predictive Maintenance). Данный подход основан на непрерывном мониторинге параметров работы оборудования, анализе диагностических данных и применении методов математического моделирования, машинного обучения и анализа больших данных для прогнозирования вероятности отказа. Использование предиктивной аналитики позволяет выявлять ранние признаки деградации компонентов, оптимизировать графики технического обслуживания и существенно повышать коэффициент технической готовности оборудования.

Таким образом, внедрение предиктивных моделей надежности и интеллектуальных систем мониторинга состояния медицинской техники становится ключевым направлением повышения эффективности эксплуатации высокотехнологичного оборудования и обеспечения устойчивости медицинской инфраструктуры.

## Цель исследования

Разработка и апробация математической модели прогнозирования отказов высокотехнологичного медицинского оборудования на основе методов предиктивного обслуживания для повышения надежности эксплуатации и снижения внеплановых простоев.

## Задачи исследования

- Проанализировать существующие подходы к техническому обслуживанию медицинского оборудования.
- Исследовать структуру отказов и основные факторы эксплуатационной нестабильности ВМО.
- Построить математическую модель оценки остаточного ресурса оборудования на основе двухпараметрического распределения Вейбулла.

- Сформулировать правило принятия решений для инициации превентивного сервисного вмешательства.
- Провести апробацию модели на данных эксплуатации медицинского оборудования и оценить ее эффективность.

### Научная новизна

Научная новизна исследования заключается в разработке интегрированной модели прогнозирования отказов высокотехнологичного медицинского оборудования, сочетающей методы статистического анализа надежности и предиктивного обслуживания. Предложен подход к оценке остаточного ресурса оборудования на основе параметров распределения Вейбулла, позволяющий формировать оптимальные интервалы технического обслуживания и повышать коэффициент технической готовности медицинских систем.

### Практическая значимость

Практическая значимость работы заключается в возможности внедрения предложенной модели в системы мониторинга состояния медицинского оборудования. Использование предиктивного подхода позволяет снизить внеплановые простои техники, оптимизировать затраты на техническое обслуживание и повысить устойчивость функционирования медицинской инфраструктуры.

### Материалы и методы исследования

В рамках исследования использованы методы теории надежности, статистического анализа отказов и математического моделирования процессов деградации технических систем. Объектом исследования выступает высокотехнологичное медицинское оборудование (ВМО), включающее диагностические и терапевтические комплексы: компьютерные томографы, магнитно-резонансные томографы, системы лучевой терапии и другие устройства, характеризующиеся сложной многокомпонентной структурой.

Информационной базой исследования послужили данные эксплуатационной статистики отказов медицинского оборудования, а также результаты мониторинга технического состояния отдельных узлов и компонентов. Анализ отказов проводился с использованием методов структурной декомпозиции, позволяющих выделить основные группы неисправностей: механические, электронные, программно-аппаратные и эксплуатационные.

Для количественной оценки надежности оборудования использована функция надежности, характеризующая вероятность безотказной работы системы в течение заданного времени.

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Где  $R(t)$  — вероятность безотказной работы оборудования за время  $t$   
 $\lambda$  — интенсивность отказов.

Для описания процессов старения и деградации компонентов оборудования применено двухпараметрическое распределение Вейбулла, широко используемое при анализе надежности сложных технических систем:

$$R(t) = e^{-(t/\eta)^\beta}$$

Где:  $\beta$  — параметр формы распределения, характеризующий характер деградации системы;  $\eta$  — параметр масштаба, определяющий характерное время наработки до отказа.

Значение параметра формы  $\beta$  позволяет интерпретировать стадии жизненного цикла оборудования:

- $\beta < 1$  — период ранних отказов, связанный с дефектами производства или установки;
- $\beta = 1$  — случайные отказы с постоянной интенсивностью;

- $\beta > 1$  — стадия износа и старения компонентов.

Оценка параметров распределения выполнялась методом максимального правдоподобия на основе статистических данных о времени наработки до отказа. Полученные параметры использовались для расчёта остаточного ресурса оборудования и формирования прогностической модели возникновения отказов.

На основе анализа динамики функции надежности сформулировано решающее правило для инициации предиктивного сервисного вмешательства. Сервисное обслуживание рекомендуется проводить при достижении порогового значения вероятности безотказной работы, что позволяет минимизировать риск внезапных отказов и оптимизировать график технического обслуживания оборудования.

### Результаты исследования

В ходе исследования проведён анализ статистики отказов высокотехнологичного медицинского оборудования, используемого в диагностических и терапевтических подразделениях медицинских учреждений. Полученные данные позволили определить структуру наиболее распространённых типов неисправностей и их влияние на эксплуатационную стабильность оборудования.

Анализ показал, что наибольший вклад в общую структуру отказов вносят механические неисправности, связанные с износом подвижных элементов и усталостным разрушением узлов. Существенную долю составляют также электронные сбои, вызванные термической деградацией полупроводниковых компонентов и нестабильностью электронных модулей. Кроме того, выявлена группа программно-аппаратных отказов, обусловленных ошибками взаимодействия между аппаратной и программной частью медицинских систем.

Полученные результаты позволили сформировать типовую структуру отказов высокотехнологичного медицинского оборудования:

| Тип отказа                   | Основная причина                                | Доля, % |
|------------------------------|---|---------|
| Механический износ           | усталостное разрушение, люфт, износ подшипников | 25–30   |
| Электронные сбои             | деградация микросхем, температурные нагрузки    | 20–25   |
| Программно-аппаратные ошибки | сбои в интерфейсах и программных модулях        | 15–20   |
| Эксплуатационные факторы     | условия среды, человеческий фактор              | 10–15   |
| Прочие неисправности         | случайные и редкие дефекты                      | 10–15   |

На основе статистических данных была выполнена оценка параметров распределения Вейбулла для различных типов оборудования. Результаты анализа показали, что для большинства компонентов медицинской техники характерны значения параметра формы  $\beta > 1$ , что свидетельствует о преобладании деградационных процессов и постепенного износа оборудования.

Применение предложенной модели прогнозирования отказов позволило сформировать алгоритм инициации сервисного вмешательства на основе оценки остаточного ресурса оборудования. В отличие от традиционной системы планово-предупредительного ремонта, предиктивный подход позволяет выполнять обслуживание именно в тот момент, когда вероятность отказа начинает существенно возрастать.

Результаты апробации модели показали, что внедрение предиктивного обслуживания позволяет:

- снизить внеплановые простои оборудования на **18–25%**;

- повысить коэффициент технической готовности медицинских систем;
- оптимизировать затраты на техническое обслуживание и ремонт.

### Заключение

В работе рассмотрены современные подходы к повышению надежности эксплуатации высокотехнологичного медицинского оборудования на основе применения методов предиктивного обслуживания. Проведён анализ структуры отказов медицинских систем и выявлены основные факторы эксплуатационной нестабильности.

Предложена математическая модель оценки остаточного ресурса оборудования на основе двухпараметрического распределения Вейбулла, позволяющая прогнозировать вероятность возникновения отказов и оптимизировать интервалы технического обслуживания. На основе анализа функции надежности сформулировано решающее правило инициации превентивного сервисного вмешательства.

Результаты апробации модели подтверждают эффективность предиктивного подхода и демонстрируют возможность снижения внеплановых простоев оборудования на 18–25%. Полученные результаты могут быть использованы при разработке интеллектуальных систем мониторинга состояния медицинской техники и внедрении цифровых технологий управления эксплуатацией медицинской инфраструктуры.

### Список литературы

1. Shamayleh A., Awad M., Farhat J. IoT-based predictive maintenance management of medical equipment. — *Journal of Medical Systems*, 2020, Vol. 44, Article 72.
2. Rahman N. H., Ibrahim A. K., Hasikin K., Razak N. A. A. Critical device reliability assessment in healthcare services. — *Journal of Healthcare Engineering*, 2023.
3. Verma A., Narula A., Katyal A. et al. Failure rate prediction of equipment: can Weibull distribution be applied to automated hematology analyzers? — *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*, 2018.
4. Peruničić Ž., Lalatović I., Spahić L. et al. Enhancing mechanical ventilator reliability through machine learning-based predictive maintenance. — *Technology and Health Care*, 2025.
5. Schmidt M. Predictive maintenance strategies for healthcare equipment using machine learning. — *Hong Kong Journal of AI and Medicine*, 2024.
6. Ivanova N. Machine learning approaches for predictive maintenance in medical equipment. — *Journal of Machine Learning in Pharmaceutical Research*, 2024.
7. Yi Y. Predictive maintenance of equipment driven by machine learning. — *Applied and Computational Engineering*, 2025.
8. Akpan N. P., Anyi-Akparanta E. R. Reliability model of medical equipment in a university teaching hospital. — *Earthline Journal of Mathematical Sciences*, 2024.
9. Yang L., Wu M., Su L. et al. Research on predictive maintenance of medical equipment based on Weibull distribution. — *China Digital Medicine*, 2025.
10. Zhang Y., Amaitik S. Predictive maintenance modelling for through-life engineering services. — *Procedia CIRP*, 2017.
11. Schmidt M., Müller T. Predictive maintenance in Industry 4.0: data-driven approaches and applications. — *Applied Sciences*, 2022.
12. Cummins L., Sommers A., Ramezani S. B., Mittal S., Rahimi S. Explainable predictive maintenance: methods, challenges and opportunities. — *Artificial Intelligence Review*, 2024.
13. Campbell J. D., Jardine A. K. S. *Maintenance Excellence: Optimizing Equipment Life-Cycle Decisions*. — New York: CRC Press, 2001.
14. Jardine A. K. S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. — *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006.

15. Aggarwal K., Atan O., Farahat A. et al. Failure event prediction and time-to-failure modeling for predictive maintenance. — IEEE Transactions on Reliability, 2019.