

УДК 681.518.5

URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/icec/auto/1043.html>

ОБЗОР ПРЕДИКТИВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ: ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ, МЕТОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Р. Махмуд

rami.mahmoud119900@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Работа посвящена понятию обслуживания в промышленных предприятиях. Проанализированы различные виды обслуживания с акцентом на их преимуществах и недостатках. Особое внимание уделено предиктивному обслуживанию, что обусловлено его связью с концепцией Четвертой промышленной революции и ее технологиями. Показано значительное влияние предиктивного обслуживания на улучшение производственных процессов и снижение затрат по сравнению с более распространенными видами обслуживания: реактивным и профилактическим. Рассмотрены конкретные технологии предиктивного обслуживания, такие как анализ вибрации, тепловизионная съемка, анализ трения и ультразвуковой анализ, а также затраты на эти технологии. Показано, как с помощью технологий предиктивного обслуживания можно достичь целей оптимального обслуживания.

Ключевые слова: предиктивное обслуживание, Четвертая промышленная революция, реактивное обслуживание, профилактическое обслуживание, анализ вибрации, тепловизионная съемка, анализ трения, ультразвуковой анализ

Введение. С начала Первой промышленной революции обслуживание считали второстепенным и выполняли только после устранения неисправностей (корректирующее обслуживание), в то время как основное внимание уделялось производственному процессу и продукту [1]. Однако изменения и конкуренция в индустрии привели к разработке новых процессов обслуживания, направленных на продление срока службы машин и предотвращение внезапных остановок с помощью планового обслуживания.

Многочисленные экономические исследования показали, что процессы обслуживания приводят к высоким затратам, рассматриваемым как расточительство и увеличивающим стоимость продукта [2]. Предиктивное обслуживание появилось как решение для предотвращения неисправностей и повышения эффективности машин при снижении затрат.

Технологический прогресс (особенно системы программируемого управления (PLC) и SCADA) способствовал распространению предиктивного обслуживания.

В эпоху Четвертой промышленной революции, технологий Интернета вещей (IoT) и облачных платформ были разработаны инструменты для ана-

лиза данных и предупреждений о необходимости обслуживания, что сделало предиктивное обслуживание ключевым фактором в поддержании конкурентного преимущества компаний.

Определение обслуживания. Обслуживание определяется несколькими способами, отражающими его важность в различных областях:

1) Федеральные стандарты США (Federal Standards 1037C, 1996) определяют обслуживание как «любое действие, такое как испытания, замены и ремонты, направленное на восстановление или поддержание функциональной единицы в определенном состоянии» [3];

2) Британский институт стандартов (British Standards Institute — BSI) определяет его как «набор технических, управленческих и организационных процедур на протяжении жизненного цикла элемента, направленных на его сохранение или восстановление до состояния, позволяющего выполнять требуемую функцию» [4].

Обслуживание является ключевым компонентом для объектов — от домов до крупных заводов и сложных производственных линий. Дизайнеры машин считают, что у каждой машины есть рассчитанный жизненный цикл, например, 3000 рабочих часов. На рис. 1 представлена кривая ванны, показывающая взаимосвязь между числом отказов машины и временем ее работы.

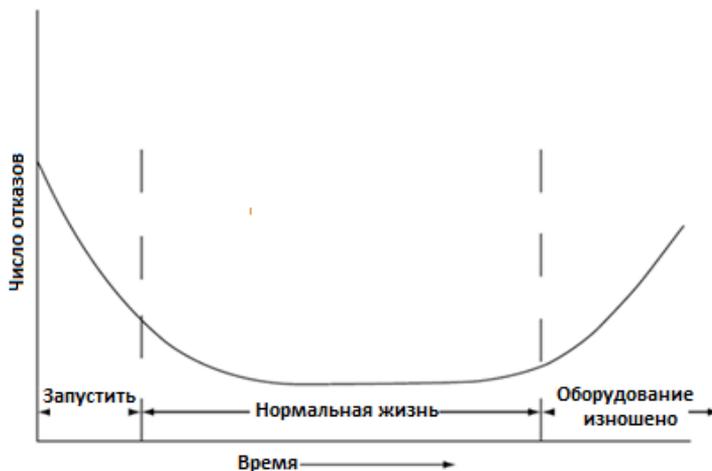


Рис. 1. Кривая ванны (Curve Bathtub)

Кривую можно разделить на три временные зоны, продолжительность которых зависит от типа машины [5]:

1) зона запуска (Start Up). Это период первого запуска машины, когда уровень отказов высок, а затем снижается с накоплением опыта;

2) зона нормальной жизни (Normal Life). Характеризуется низким и стабильным уровнем отказов, в течение которого возможности машины используются оптимально;

3) зона износа (Equipment Warn Out). Определяется как период старения, когда уровень отказов постепенно увеличивается до полного выхода из строя.

Важность обслуживания. Обслуживание является важным элементом жизненного цикла машины, направленным на поддержание ее рабочего состояния и эффективное выполнение функций. Цель обслуживания — продлить срок службы машины для обеспечения наилучших инвестиций, при этом экономическая выгода остается ключевой. Расходы на обслуживание в металлургической промышленности составляют от 20 до 50 % производственных затрат, а бюджет на обслуживание в Европе достигает примерно 1500 млрд евро в год без учета потерь из-за остановки производственных линий. Компании, которые сделали обслуживание основой своего производства, достигли экономических преимуществ благодаря снижению числа отказов, стабильности производства и сокращению затрат. Кроме того, это улучшает моральный дух работников и повышает качество продукции и безопасность.

Типы обслуживания. С течением времени появились различные концепции и школы обслуживания, такие как европейский стандарт EN 13306, немецкий стандарт DIN 2003, стандарт Министерства энергетики США (US DOE) и др. Обслуживание также подразделяют на несколько типов. Ниже перечислены некоторые из них.

Реактивное обслуживание. Это обслуживание, которое выполняется после отказа машины и потери ее способности выполнять свои функции. В этот тип входит так называемое корректирующее обслуживание, которое включает в себя:

1) отложенное корректирующее обслуживание (Deferred Corrective Maintenance — DCM);

2) немедленное корректирующее обслуживание (Immediate Corrective Maintenance — ICM).

При реактивном обслуживании время устранения неисправности неизвестно, что приводит к большим потерям из-за остановки производства, а также к увеличению затрат на ремонт и сокращению рабочего срока машины. Тем не менее реактивное обслуживание по-прежнему используется в настоящее время, поскольку не требует никаких затрат, пока машина работает.

Предупредительное обслуживание. В отличие от реактивного, предупредительное обслуживание направлено на выявление причин отказа маши-

ны и их устранение до возникновения проблемы. Таким образом, оно позволяет устранять коренные причины сбоев, а не симптомы отказа. В этот тип обслуживания входят два основных подтипа:

1) Профилактическое обслуживание. Его выполняют через заранее установленные интервалы времени, чтобы снизить вероятность отказа или ухудшения работы машин. Оно включает несколько подкатегорий: обслуживание, основанное на состоянии (CBM), времени (TBM), надежности (RCM), использовании (UBM) и возрасте (AGM);

2) Предииктивное обслуживание. Его можно определить как обслуживание, основанное на прогнозировании, полученном по результатам регулярного анализа состояния машины, а затем оценке этой информации для определения уровня ее производительности.

Всеобъемлющее производственное обслуживание (TPM). TPM считается комплексной системой, направленной на улучшение производительности, надежности машин и качества продукции, а также на повышение морального духа работников, проведение обслуживания в управлении, обучение и непрерывное обучение, акцентирование внимания на безопасности и других важных принципах. На рис. 2 представлена схема типов технического обслуживания [5].

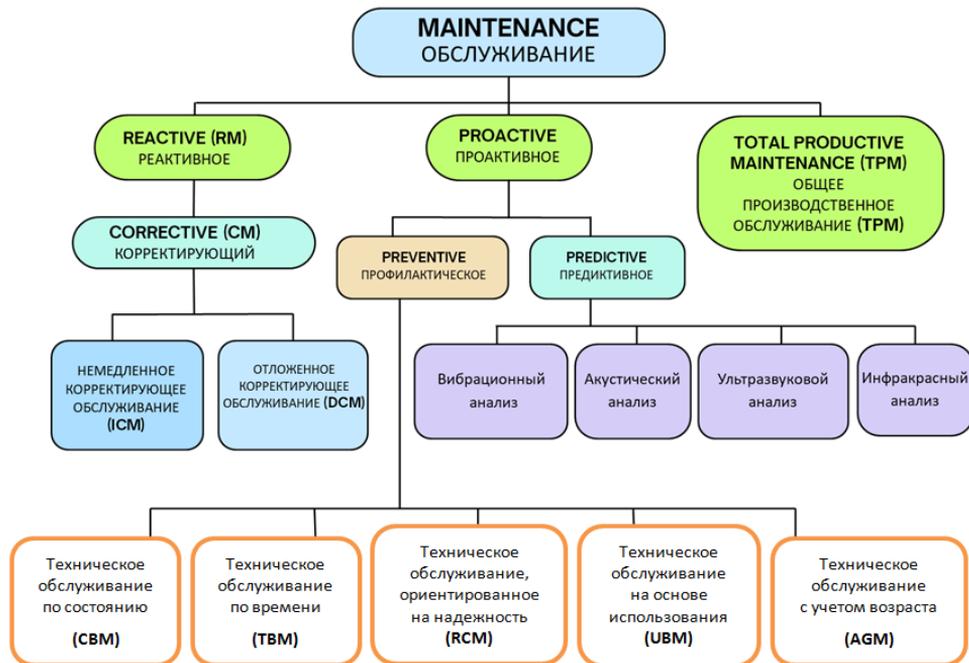


Рис. 2. Схема видов технического обслуживания

В условиях такого большого и разнообразного выбора типов обслуживания возникают вопросы о том, как компании выбрать подходящую стратегию и какие критерии можно использовать для определения наилучшего варианта? Перечислим основные шаги выбора подходящей стратегии.

1. Оценка текущей ситуации на основе таких критериев, как среднее время между отказами (MTBF) и общая эффективность оборудования (ОЕЕ).

2. Использование комплексных аналитических моделей для ранжирования важности оборудования по шкале от 1 до 5, где 1 означает наименьшую серьезность, а 5 — катастрофическую. Анализ включает такие факторы, как безопасность, затраты на обслуживание, время на выявление неисправностей и их влияние на производство, а также экологические последствия.

3. Оценка затрат на стратегии обслуживания.

4. Использование так называемой матрицы стратегий обслуживания, представленной на рис. 3, в которой стратегии обслуживания разделены на четыре части.



Рис. 3. Матрица стратегии технического обслуживания

Первая четверть матрицы соответствует предиктивному обслуживанию, которое используется, когда отказ является катастрофическим и стоимость мониторинга высока (например, в нефтяных компаниях), вторая четверть — профилактическому обслуживанию, основанному на времени. Третья чет-

верть соответствует реактивному обслуживанию, четвертая — профилактическому обслуживанию, основанному на состоянии.

Предиктивное обслуживание. Предиктивное обслуживание отличается от других стратегий тем, что основывается на анализе данных о состоянии машины. Например, большинство людей меняют масло в двигателе автомобилей после каждого пробега в 3000...5000 км, что является «профилактическим обслуживанием». В отличие от этого, предиктивное обслуживание позволяет постоянно анализировать качество масла, что позволяет продлить его использование на дополнительные 1000 км. Несмотря на прогресс технологий, статистика показывает, что в 30 % отраслей предиктивное обслуживание не используется, предпочтение отдается профилактическому обслуживанию [6].

Предиктивное обслуживание определяется как обслуживание, осуществляемое на машинах, в которых ожидается возникновение проблем, будь то из-за старения или экологических условий, с целью предотвращения внезапной остановки во время работы. Это сочетание математических моделей, которые определяют время возникновения проблемы и момент проведения обслуживания для улучшения соотношения между затратами на обслуживание и производительностью машины. На рис. 4 показано различие в методах работы между различными стратегиями обслуживания [5].

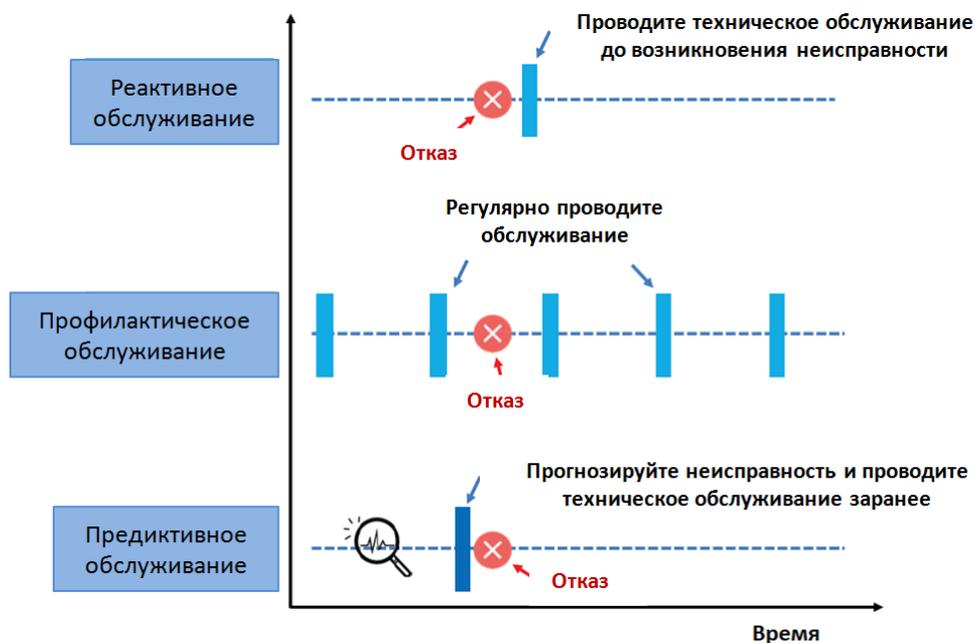


Рис. 4. Разница между различными стратегиями обслуживания (RM, PM, PdM)

Преимущества предиктивного обслуживания. Исследования показывают, что правильно работающая программа предиктивного обслуживания может обеспечить экономию от 8 до 12 % по сравнению только с профилактическим обслуживанием. С развитием концепции предиктивного обслуживания исследования указывают, что экономия может превышать 30 % и достигать 40 % [7]. Многие компании начали использовать технологии предиктивного обслуживания, в том числе:

– компания Infrabel, отвечающая за инфраструктуру железных дорог в Бельгии, достигла качественного прорыва, перейдя на применение предиктивного обслуживания. Помимо экономической выгоды от использования технологий предиктивного обслуживания компания смогла обеспечить безопасность своих сотрудников, которые ранее полагались на визуальный осмотр;

– компания VOLOV использовала систему анализа данных для автомобилей и грузовиков через Интернет, что позволило сократить время диагностики неисправности на 70 % и снизить время ремонта на 20 %;

– компания Sandvik Mining and Rock Technology сократила время простоя шахт на 30 %, что привело к снижению затрат на 50 % на каждую тонну продукции из сырья.

Реактивное обслуживание (PM) имеет низкие затраты на профилактику, так как основано на эксплуатации до отказа, но в случае отказа стоимость ремонта максимальна. Профилактическое обслуживание снижает затраты на реактивное обслуживание благодаря периодическим мероприятиям, предотвращающим отказы, однако такие мероприятия, как регулярные проверки и замены, увеличивают затраты.

На рис. 5 показана связь между стоимостью и объемом работ по обслуживанию, а также расположение стратегий обслуживания.

Профилактическое обслуживание снижает количество отказов и кривую общей стоимости до оптимальной точки, после которой затраты на профилактику начинают расти. Предиктивное обслуживание находится в пределах этой оптимальной точки, обеспечивая лучший баланс между затратами на ремонт и профилактику, что подчеркивает его экономическую важность.

Предиктивное обслуживание и Четвертая промышленная революция (PdM 4.0). Предиктивное обслуживание стало частью Четвертой промышленной революции с использованием таких технологий, как Интернет вещей (IoT), хранение и анализ данных, а также большие данные. Эта тенденция известна как PdM 4.0 и считается четвертым уровнем предиктивного обслуживания [8].

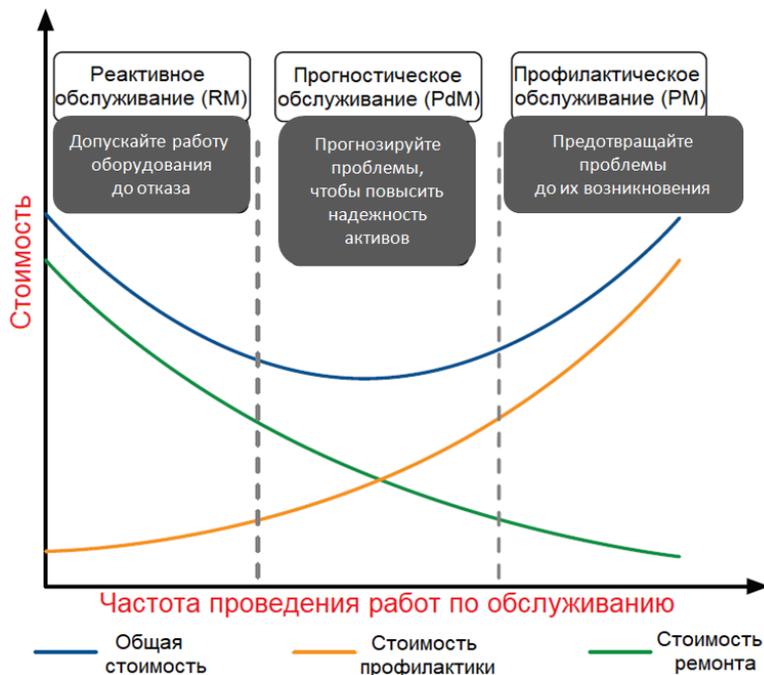


Рис. 5. Сравнение различных стратегий технического обслуживания RM PM, PdM с точки зрения стоимости

Стратегии обслуживания подразделяют на четыре уровня [7]:

- 1) визуальные инспекции;
- 2) инструментальные инспекции;
- 3) инспекции состояния в реальном времени;
- 4) непрерывный мониторинг машины и отправка уведомлений на основе предиктивных алгоритмов, получающих данные через Интернет вещей (PdM 4.0).

Технологии предиктивного обслуживания. Под технологиями предиктивного обслуживания понимают использование датчиков и инструментов, которые постоянно считывают состояние машины для выявления отклонений в ее работе и принятия решений о техническом обслуживании. Основные и наиболее часто используемые датчики и технологии перечислены ниже.

Датчики вибрации. Вибрация определяется как движение гибкого тела взад и вперед относительно положения покоя [9]. Она может использоваться для прогнозирования отказов (например, водители автомобилей ощущают механические проблемы через вибрацию в рулевом колесе). Однако человеческое восприятие недостаточно для точного определения вибрации, поэтому используются датчики, устанавливаемые на части машины. Вибрационный

анализатор, подключенный к датчикам, отображает и анализирует значения и может быть интегрирован с системами PLC. Стоимость датчиков варьируется от 100 до 50000 долл. США в зависимости от типа и необходимых инструментов [10]. Однако экономия от использования этой технологии считается значительной. На рис. 6 показаны датчики вибрации и способ их установки на двигателях.



Рис. 6. Применение вибрации:

a — датчики вибрации; *б* — способ установки датчиков на машину; *в* — цифровой анализатор вибрации

Тепловизионная съемка. Тепловизионная съемка — это процесс получения фотографий с использованием инфракрасного излучения [11]. Эта технология позволяет обнаруживать изменения температуры точек машины, возникающие из-за технических неисправностей, что помогает в профилактике до возникновения отказа. На рис. 7 представлено устройство для термообработки и термографическое изображение, на котором видно элемент, нагретый в результате ослабления соединения кабеля с выключателем.



Рис. 7. Применение термографии:

a — устройство для термообработки; *б* — термографическое изображение

Технология тепловизионной съемки считается высокозатратной, так как цена тепловизоров варьируется от 12,000 до 20,000 долларов, а стоимость камер с полными функциями может достигать 65,000 долларов. К другим расходам относятся компьютеры, программное обеспечение и обучение техников работе с устройством и анализу изображений [10]. Период окупаемости обычно составляет в среднем 12 месяцев или меньше.

Анализ трения. Трение, смазка и износ являются основными аспектами любой механической системы [12]. Программы науки о трении направлены на решение последствий этих трех элементов с точки зрения общих затрат на предприятие.

Технология анализа масла является одной из самых важных в науке о трении и делится на три основные категории: химия, загрязнение и износ. Эти категории представлены в схеме Tri-vector, определяющей качество и пригодность масла и его влияние на машину, как показано на рис. 8. Анализ масла проводят в специализированных лабораториях. На рис. 9 представлена модель устройства для анализа масла MiniLab.



Рис. 8. Тривекторная схема анализа ультразвука



Рис. 9. Прибор MiniLab

Ультразвук — это звуковые волны с частотами выше 20 кГц, что означает, что они выходят за пределы слышимости человека. Эти волны можно услышать только с помощью специальных устройств, которые преобразуют их в слышимые звуки [13]. Датчик преобразует ультразвуковые волны в звуковые, которые можно услышать через динамики, или измеряет энергию волн и отображает ее на цифровом экране, как показано на рис. 10, 11.

Технология ультразвукового анализа отличается относительно низкими затратами, поскольку цена устройства для анализа варьируется от 1000 до 12000 долл. США, а стоимость обучения невысока, что обеспечивает срок окупаемости до 6 месяцев или менее [10].



Рис. 10. Детектор ультразвуковых волн



Рис. 11. Устройство измерения акустической вибрации

Заключение. В данном исследовании рассмотрена концепция предиктивного обслуживания, представлен общий обзор современных технологий и методов, используемых при реализации предиктивного обслуживания, а также проанализированы затраты на эти технологии и способы достижения целей предиктивного обслуживания. В результате исследования были сделаны следующие выводы.

1. Предиктивное обслуживание способствует снижению числа отказов оборудования, что помогает поддерживать минимальный уровень поломок на объектах.

2. Эта новая концепция способствует снижению производственных затрат в результате сокращения ненужных расходов на текущие стратегии обслуживания и уменьшения объемов закупок ненужных запасных частей.

3. Предиктивное обслуживание повышает уровень качества продукции, поддерживая надежность машин и увеличивая уровни производительности благодаря непрерывному и точному мониторингу различных параметров машин и окружающей среды.

Перспективы предиктивного обслуживания направлены на дальнейшие инновации и развитие с увеличением зависимости от технологий искусственного интеллекта и машинного обучения. Ожидается, что эти разработки будут способствовать повышению точности прогнозов и снижению зависимости от традиционного человеческого опыта. Кроме того, интеграция Интернета вещей (IoT) с системами предиктивного обслуживания поможет улучшить сбор данных в реальном времени, что повысит способность организаций принимать быстрые и точные решения.

Литература

- [1] Douglas S.T., Brian A.W. *Economics of Manufacturing Machinery Maintenance: A Survey and Analysis of U.S. Costs and Benefits*. Advanced Manufacturing Series (NIST AMS), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2020, 52 p. <https://doi.org/10.6028/NIST.AMS.100-34>
- [2] Poor P., Zenisek D., Basl J. Historical Overview of Maintenance Management Strategies: Development from Breakdown Maintenance to Predictive Maintenance in Accordance with Four Industrial Revolutions. *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Pilsen, Czech Republic, 2019.
- [3] *Telecommunication: Glossary of Telecommunication Terms*. National Communication System Technology and Standards Division, USA, General Services Administration Information Technology Service, 1996.
- [4] BS EN 13306:2010. *British Standards Institute. Maintenance Terminology*. UK, British Standards Institute, 2010.
- [5] Elias H. *Predictive Maintenance: Techniques and Applications in PLC and IoT — Case Study In Jableh Mill*. Master's thesis, SUV, 2021.
- [6] Hashemian H.M. State-of-The-Art Predictive Maintenance Techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2011, vol. 60, no. 1, pp. 226–236.
- [7] Ran Y., Zhou X., Lin P., Wen Y., Deng R. A Survey of Predictive Maintenance: Systems, Purposes and Approaches. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.07383>
- [8] *Predictive Maintenance 4.0 Beyond the Hype: PdM 4.0 Delivers Results*. Mainnovation, Pricewater-house Coppers PWC, 2018.
- [9] Girdhar P., Scheffer C. *Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance*. UK, Elsevier, 2004.
- [10] Sullivan G.P., Pugh R., Melendez A.P., Hunt W.D. *Operation & Maintenance Best Practices: A Guide to Achieving Operational Efficiency*. USA, U.S. Department of Energy, 2002.
- [11] Levitt J. *Complete Guide to Preventive and Predictive Maintenance*. USA, Industrial Press Inc., 2011.
- [12] Garvey R., Fogel G. *Converting Tribology Based Condition Monitoring into Measurable Maintenance Results*. Computational Systems Inc., 1998.
- [13] Rienstra A., Hall J. *Ultrasonic Detection: Applying Acoustic Vibration Monitoring to Predictive Maintenance*. SDT North America, 2010.

Поступила в редакцию 09.02.2025

Махмуд Рами — аспирант кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Гаврюшин Сергей Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Махмуд Р. Обзор предиктивного обслуживания: его характеристики, методы и перспективы развития. *Политехнический молодежный журнал*, 2025, № 3 (98). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/icec/auto/1043.html>

PREDICTIVE MAINTENANCE REVIEW: ITS CHARACTERISTICS, METHODS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

R. Mahmoud

rami.mahmoud119900@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

The paper is devoted to the concept of maintenance at the industrial enterprises. It analyses various types of maintenance with an emphasis on their advantages and disadvantages. Particular attention is paid to the predictive maintenance, which is caused by its association with the concept of the Fourth Industrial Revolution and its technologies. The paper shows significant impact of the predictive maintenance on improving the production processes and reducing costs in comparison with the more common maintenance types: reactive and protective. It considers specific predictive maintenance technologies, such as vibration analysis, thermal imaging, friction analysis and ultrasonic analysis, as well as costs of these technologies. The paper demonstrates how the predictive maintenance technologies could be applied to achieve the optimal maintenance goals.

Keywords: predictive maintenance, Fourth Industrial Revolution, reactive maintenance, protective service, vibration analysis, thermal imaging, friction analysis, ultrasonic analysis

Received 09.02.2025

Mahmoud R. — Postgraduate, Department of Computer Systems for Industrial Automation, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Gavriushin S.S., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Computer Systems for Industrial Automation, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Mahmoud R. Predictive maintenance review: its characteristics, methods and development prospects. *Politekhnicheskij molodezhnyy zhurnal*, 2025, no. 3 (98). (In Russ.). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/icec/auto/1043.html>