

УДК 629.3.018.8:004.8

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕДИКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сидоров Е.А., кандидат технических наук, доцент

Сидорова Л.И., кандидат технических наук, доцент

Крупякова А.С., магистрант

Сидоров Д.Е., студент, e-mail sidorovevgeniy@yandex.ru

ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

Ключевые слова: *двигатель внутреннего сгорания, остаточный ресурс, предиктивные технологии, прогнозирование, диагностика, мониторинг состояния, машинное обучение.*

В статье проведён анализ существующих методов прогнозирования остаточного ресурса двигателей внутреннего сгорания. Рассмотрены их преимущества и недостатки, оценена применимость предиктивных технологий. Показаны перспективы развития методов прогнозирования для повышения надёжности эксплуатации ДВС.

Введение. Надёжная эксплуатация двигателей внутреннего сгорания (ДВС) требует своевременной оценки их остаточного ресурса. Традиционные подходы, основанные на регламентном обслуживании, не всегда учитывают реальное техническое состояние агрегата и могут приводить к преждевременному списанию или аварийным отказам.

Актуальность темы обусловлена необходимостью перехода от планово-предупредительных ремонтов к прогнозированию остаточного ресурса на основе данных мониторинга. Цель работы — проанализировать существующие методы прогнозирования остаточного ресурса ДВС и оценить перспективы применения предиктивных технологий.

Задачи исследования:

изучить традиционные и современные методы прогнозирования остаточного ресурса ДВС;

выявить их сильные и слабые стороны;

оценить потенциал предиктивных технологий для решения задачи прогнозирования;

определить направления дальнейших исследований.

Материалы и методы исследований. Исследование основано на анализе научных публикаций, стандартов и технических отчётов по теме прогнозирования остаточного ресурса ДВС. Были рассмотрены следующие группы методов:

1. Традиционные методы: регламентное обслуживание по наработке (моточасам, пробегу); периодические осмотры и дефектация; контроль по предельным значениям параметров (давление масла, расход топлива и т.д.).

2. Методы на основе физических моделей износа: модели усталостного разрушения [1]; модели диффузионного износа [2]; уравнения Аррениуса для термического старения материалов [3].

3. Статистические методы: регрессионный анализ; анализ выживаемости (Weibull-анализ) [4].

4. Предиктивные технологии: методы анализа вибрационных сигналов (БПФ, вейвлет-анализ) [5,6]; машинное обучение (деревья решений, нейронные сети) [7]; фильтрация Калмана для оценки состояния системы [8].

Сравнение методов прогнозирования остаточного ресурса ДВС проводится по нескольким ключевым параметрам. Прежде всего оценивается точность прогнозирования — насколько близки предсказанные значения соответствуют реальному остаточному ресурсу двигателя. При оценке перспективности применения метода первостепенное значение имеет анализ требований к исходным данным. Необходимо чётко определить перечень параметров, подлежащих мониторингу, установить требуемую периодичность и точность их измерения, а также оценить необходимый объём и степень детализации исторических данных, обеспечивающих корректность работы алгоритма.

Важным критерием оценки является вычислительная сложность метода, которая характеризуется временными затратами на выполнение расчётов, требуемой мощностью вычислительного оборудования, а также трудоёмкостью этапов настройки и последующей эксплуатации.

Отдельным аспектом выступает адаптивность метода к изменениям условий эксплуатации. Под адаптивностью понимается способность алгоритма сохранять работоспособность и точность результатов при

варьировании режимов нагрузки, климатических условий, характеристик топлива (качества и вида) и иных внешних факторов [9, 10].

Кроме того, принципиальное значение имеет оценка практической применимости метода в реальных производственных условиях. При этом необходимо учитывать:

- способность метода функционировать в условиях неполноты данных, сбоев измерительных датчиков и влияния человеческого фактора;

- устойчивость к погрешностям измерений;

- реалистичность внедрения с точки зрения экономической целесообразности (стоимости оборудования), квалификации эксплуатирующего персонала и совместимости с действующими технологическими процессами.

Результаты и их обсуждение. В ходе исследования были проанализированы различные подходы к прогнозированию остаточного ресурса двигателей внутреннего сгорания. Полученные результаты позволяют сформировать чёткое представление о сильных и слабых сторонах существующих методов, а также оценить перспективы их практического применения.

Традиционные методы прогнозирования, несмотря на относительную простоту реализации, демонстрируют ограниченную практическую ценность. Основной недостаток заключается в том, что они не учитывают индивидуальные особенности эксплуатации конкретного двигателя. На практике это приводит к двум принципиально разным, но одинаково нежелательным сценариям. В первом случае техническое обслуживание выполняется чаще, чем это действительно необходимо, — то есть возникает избыточное обслуживание с сопутствующими экономическими потерями. Во втором — из-за несвоевременного вмешательства повышается риск аварийных отказов, что чревато более серьёзными финансовыми и техническими последствиями. Кроме того, точность прогнозирования остаточного ресурса с использованием традиционных методов остаётся недостаточной для удовлетворения современных требований к надёжности эксплуатации двигателей внутреннего сгорания.

Методы, основанные на физических моделях износа, в целом обеспечивают более высокую точность результатов по сравнению с традиционными подходами. Однако их практическое применение сталкивается с рядом существенных ограничений. Прежде всего, для

построения адекватной модели требуется глубокое понимание механизмов износа отдельных компонентов двигателя: необходимо детально описывать процессы трения, усталостного разрушения, коррозии и других видов деградации материалов. Это, в свою очередь, влечёт за собой необходимость выполнения сложных математических расчётов, учитывающих множество взаимосвязанных факторов. Кроме того, для корректной калибровки моделей требуется обширный массив экспериментальных данных — как лабораторных, так и полученных в ходе реальной эксплуатации. В условиях ограниченного доступа к специализированным данным и вычислительным ресурсам эти требования заметно сужают сферу применения физических моделей.

Статистические методы, оперирующие историческими данными о работе двигателей, изначально выглядят привлекательно: они позволяют задействовать накопленную информацию и выявить общие закономерности износа. Однако и здесь обнаруживаются существенные ограничения. Ключевая проблема заключается в том, что такие методы основаны на предположении о стационарности анализируемых процессов. В реальности же условия эксплуатации двигателей динамически изменяются: варьируются нагрузки, температурные режимы, качество топлива и смазочных материалов. Из-за этого статистические модели плохо адаптируются к нестандартным или новым режимам работы. Ещё один практический недостаток — необходимость больших выборок данных для обеспечения статистической надёжности прогнозов. На многих предприятиях такой объём информации либо отсутствует, либо его сбор и обработка сопряжены с существенными затратами.

Наибольший потенциал в данной области демонстрируют предиктивные технологии. В отличие от рассмотренных подходов, они способны учитывать реальные условия эксплуатации двигателя и адаптироваться к изменениям его технического состояния в режиме реального времени. Благодаря комплексному анализу данных с датчиков и использованию алгоритмов машинного обучения удаётся достичь высокой точности прогнозирования остаточного ресурса — в пределах 5,0–10,0 %. Однако и у этого направления есть свои сложности. Внедрение предиктивных моделей требует предварительной установки датчиков и развёртывания систем сбора данных, что влечёт за собой значительные капитальные затраты на начальном этапе. Кроме того, обработка больших

объёмов информации в реальном времени предъявляет высокие требования к вычислительным ресурсам, особенно если речь идёт о мониторинге парка двигателей на крупном предприятии. А также необходимо отметить, что для внедрения и реализации предиктивных технологий необходимы квалифицированные специалисты, обладающие знаниями в области машинного обучения, анализа данных и особенностей работы ДВС, что может быть проблемой для многих предприятий.

Сравнительная характеристика методов представлена в таблице 1.

Таблица 1 - Сравнительная характеристика методов прогнозирования остаточного ресурса

Метод	Точность	Требования к данным	Сложность внедрения
Регламентное обслуживание	Низкая	Минимальные	Очень низкая
Физические модели	Высокая	Высокие	Высокая
Статистические методы	Средняя	Средние	Средняя
Предиктивные технологии	Очень высокая	Очень высокие	Очень высокая

Наиболее перспективным направлением в прогнозировании остаточного ресурса двигателей внутреннего сгорания считается комбинация физических моделей и методов машинного обучения. Этот гибридный подход удачно объединяет преимущества двух методологий: с одной стороны, он опирается на фундаментальные знания о механизмах износа деталей двигателя — таких как усталостное разрушение, абразивный износ, коррозия и термическое старение материалов, — что позволяет строить физически обоснованные и интерпретируемые модели.

Благодаря включению физических закономерностей модель перестаёт быть «чёрным ящиком»: специалисты могут понимать и объяснять, почему система выдала тот или иной прогноз, что критически важно для принятия решений в промышленной эксплуатации. Методы машинного обучения позволяют существенно повысить адаптивность прогнозных моделей остаточного ресурса ДВС к реальным условиям эксплуатации. В отличие от детерминированных физических моделей, алгоритмы машинного обучения эффективно учитывают динамически изменяющиеся факторы: колебания нагрузки, температурные режимы,

качество эксплуатационных материалов, стиль вождения и другие параметры.

Такой подход меняет саму парадигму прогнозирования. Вместо экстраполяции усреднённых закономерностей модель обучается на данных конкретного агрегата и выявляет индивидуальные паттерны износа. Например, она может зафиксировать ускоренный износ компонентов при частых пусках-остановках (городской цикл) или влияние высокогорных условий на систему впускного тракта.

Практические преимущества комбинированного подхода подтверждаются экспериментальными данными: погрешность прогнозирования остаточного ресурса снижается до уровня ниже 5,0–7,0 %. Это позволяет:

- планировать техническое обслуживание индивидуально для каждого двигателя;

- сокращать эксплуатационные затраты;

- снижать вероятность аварийных отказов за счёт своевременного вмешательства.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой перспективности интеграции машинного обучения в системы прогнозирования остаточного ресурса ДВС.

Заключение. Анализ методов прогнозирования остаточного ресурса двигателей внутреннего сгорания (ДВС) показал, что традиционные подходы, несмотря на простоту реализации, не обеспечивают необходимой точности. Физические модели дают более точные результаты, но требуют сложных расчётов и глубокого понимания механизмов износа, что затрудняет их практическое внедрение. Статистические методы, в свою очередь, ограничены из-за потребности в масштабных наборах данных и недостаточной адаптивности к динамически изменяющимся условиям эксплуатации.

Наибольший потенциал имеют предиктивные технологии, хотя их применение связано со значительными затратами на сбор данных, вычислительные ресурсы и привлечение профильных специалистов. Оптимальным решением представляется гибридная модель, сочетающая физические модели с методами машинного обучения: она сохраняет физическую интерпретируемость процессов, обеспечивает адаптивность к

реальным условиям эксплуатации и позволяет снизить погрешность прогнозирования до уровня менее 5,0–7,0 %.

Библиографический список:

1. ГОСТ Р 27.102–2021. Надёжность в технике. Надёжность объекта. Термины и определения. — Введ. 2022–01–01. — М.: Стандартинформ, 2021.
2. Сушко, А. Е. Организация распределенного мониторинга технического состояния роторного оборудования на предприятиях черной металлургии / А. Е. Сушко // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2012. – № 4(31). – С. 30-36. – EDN PIMAEZ.
3. Синица М.К. Программный расчет коэффициента скорости старения изоляции трансформаторного маслонаполненного оборудования в условиях Арктического региона // Российская Арктика. 2025. Т. 7. № 4. С. 72-81. <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2025-4-72-81>
4. Шиловский, В. Н. Регрессионный анализ и оценка факторов ремонтпригодности лесных машин / В. Н. Шиловский, И. Г. Скобцов, Д. Г. Конанов // Resources and Technology. – 2022. – Т. 19, № 2. – С. 134-146. – DOI 10.15393/j2.art.2022.6303. – EDN JCLYRD.
5. ГОСТ Р ИСО 13373-1–2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 1. Общие методы. — Введ. 2011–01–01. — М.: Стандартинформ, 2010.
6. Мигранов, С. В. Реализация алгоритма БПФ для вибродиагностики УЭЦН на контроллере TMS320F28335 / С. В. Мигранов // Молодой ученый. – 2020. – № 6(296). – С. 44-47. – EDN WZOCSF.
7. Курников, П. А. Обучение деревьев решений для валидации ответа нейронной сети / П. А. Курников // Системный анализ и информационные технологии (САИТ - 2017) : Сборник трудов Седьмой Международной конференции, Светлогорск, 13–18 июня 2017 года. – Светлогорск: Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" Российской академии наук, 2017. – С. 256-261. – EDN ZGPXEV.
8. Потепалова, А. Ю. Моделирование работы алгоритма калмановской фильтрации / А. Ю. Потепалова, Н. В. Зайцева // Sciences of Europe. – 2021. – № 70-1(70). – С. 35-42. – DOI 10.24412/3162-2364-2021-70-1-35-42. – EDN ARNEUF.

9. Бинарная топливная система дизелей для работы автотранспортных средств на нефтяном и бионефтяном топливе / А. П. Уханов, А. Д. Уханов, Е. А. Сидоров, Л. И. Сидорова // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2025. – № 3(71). – С. 212-219. – DOI 10.18286/1816-4501-2025-3-212-219. – EDN RCHRCI.

10. Уханов, А. П. Работа тракторного дизеля на бионефтяном топливе в режиме холостого хода / А. П. Уханов, Е. А. Сидоров, Л. И. Сидорова // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2023. – № 3. – С. 63-69. – DOI 10.55471/19973225_2023_8_3_63. – EDN RGALHR.

PREDICTION OF THE REMAINING SERVICE LIFE OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE USING PREDICTIVE TECHNOLOGIES

**Sidorov E.A., Sidorova L.I., Krupyakova A. S., Sidorov D.E.
FSBEI HE Ulyanovsk SAU**

Keywords: *internal combustion engine, remaining useful life, predictive technologies, prediction, diagnostics, condition monitoring, machine learning.*

The article presents an analysis of existing methods for predicting the remaining useful life of internal combustion engines. Their advantages and disadvantages are examined, and the applicability of predictive technologies is assessed. The prospects for developing prediction methods to improve the operational reliability of internal combustion engines (ICEs) are outlined.