

На правах рукописи

Юденичев Андрей Николаевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА НЕПРЕРЫВНОЙ ДИАГНОСТИКИ УЗЛОВ И
АГРЕГАТОВ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ
ПО ПРОГНОЗИРУЮЩИМ ПАРАМЕТРАМ**

Специальность: 4.3.1. Технологии, машины и
оборудование для агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»

Научный руководитель **Варнаков Дмитрий Валерьевич**,
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры «Техносферная безопасность» ФГБОУ
ВО «Ульяновский государственный
университет»

Официальные оппоненты: **Юхин Иван Александрович**,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Автотракторная техника
и теплоэнергетика» ФГБОУ ВО «Рязанский
государственный агротехнологический
университет имени П. А. Костычева»

Хакимов Рамиль Тагирович,
доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Автомобили, тракторы и технический
сервис» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный аграрный университет»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение «Федеральный научный
агроинженерный центр ВИМ»

Защита состоится 29 мая 2025 г. в 10.00 часов на заседании
диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский
государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» по
адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел.: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов):
127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке
имени Н. И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный
университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» и на сайте Университета
www.timacad.ru.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 35.2.030.03,
к.т.н., доцент

Н. Н. Пуляев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Анализ эксплуатации техники показывает, что значительная часть возникающих отказов и неисправностей приходится на двигатели. В этих условиях значительно возрастают вопросы надежности техники, как важнейшего фактора эффективности решения стоящих задач.

При этом особое внимание необходимо уделять стадии эксплуатации автомобильной техники. Ведущую роль при этом занимает деятельность, направленная на обеспечение назначенного ресурса двигателей автотранспортных средств, что достигается как обеспечением оптимальных условий эксплуатации, предусмотренных техническими требованиями заводов изготовителей, так и проведением своевременного качественного технического обслуживания и ремонта.

Интегрирование современных датчиков и микропроцессорных устройств в двигатели открывает возможности для создания бортовых систем прогнозирования, обеспечивающих оперативный мониторинг эксплуатационной надежности. Предлагаемая система, ориентированная на контроль и прогнозирование параметрической надежности двигателей в особых режимах работы, включает в себя систему оперативного контроля, принимающую корректирующие решения, и информационную систему для оптимизации периодичности технического обслуживания. Её алгоритм работы предполагает сбор эксплуатационных данных, оценку рабочих параметров двигателя, оперативный контроль состояния моторного масла и принятие корректирующих мер.

Таким образом, одним из перспективных направлений исследований в данной области является развитие системы технического обеспечения, эксплуатации и восстановления автотранспортных средств в области оперативной оценки эксплуатационной надежности двигателей автотранспортных средств, применяемых в агропромышленном комплексе.

Техническое состояние автомобилей, их узлов, агрегатов и деталей меняется в процессе эксплуатации в результате различных процессов старения (износ, усталость, коррозия и т.д.). При этом происходят изменения в диагностических параметрах. Выявление закономерностей изменения диагностических параметров позволяет прогнозировать техническое состояние транспортных средств (их деталей, узлов и агрегатов) и повышать эффективность их использования (рекомендации по повышению надежности, обоснование диагностических параметров и критериев, разработка методов и средств технического диагностирования, периодичность технического обслуживания и (корректировке номенклатуры).

Актуальность темы исследования заключается в необходимости разработки мероприятий, способов и технических средств диагностики и прогнозирования технического состояния узлов и агрегатов автотранспортных средств.

Степень разработанности темы. Вопросами оценки надежности и прогнозирования изменения технического состояния сельскохозяйственных машин занимался ряд авторов:

Голубев И.Г., Дидманидзе О.Н., Ерохин М.Н., Крагельский И.В., Курочкин В.Н., Митягин В.А., Петрашев А.И., Простоквашин В.Г., Прохоренков В.Д., Пучин Е.А., Синявский И.А., Рязанов В.Е., Северный А.Э., Тельнов Н.Ф., Уютов С.Ю., Щукин А.Р., Яковлев Б.П.

Научная задача заключается в разработке метода прогнозирования технического состояния узлов и агрегатов автотранспортных средств, основанного на нелинейных моделях деградации параметров, с применением беспроводных систем передачи данных.

Область исследований. Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта специальности 4.3.1 «Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса»:

12. Цифровые интеллектуальные технологии, автоматизированные и роботизированные технические средства для агропромышленного комплекса.

20. Методы и технические средства обеспечения надежности, долговечности, диагностики, технического сервиса, технологии упрочнения, ремонта и восстановления машин и оборудования.

22. Организация технического сервиса, ремонта, хранения, рециклинга, утилизации машин и оборудования.

Цель исследования – снижение трудоемкости и повышение оперативности при оценке технического состояния узлов и агрегатов автотранспортных средств путем разработки способа непрерывной диагностики параметров с использованием беспроводных каналов связи для передачи данных.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели необходимо последовательно решить следующие основные задачи исследования:

1. Проанализировать состояние технических средств и методов диагностики узлов и агрегатов автотранспортных средств.

2. Теоретически обосновать возможность прогнозирования технического состояния узлов и агрегатов на основе прогнозирующих параметров.

3. Разработать метод и средство диагностирования с применением беспроводной передачи данных.

4. Разработать математическую модель прогнозирования технического состояния узлов и агрегатов автотранспортных средств.

5. Привести практические рекомендации по применению предложенного метода и средств диагностирования с применением беспроводной передачи данных, оценить эффективность их применения.

Границы исследования - диагностические параметры функционирования узлов и агрегатов автотранспортных средств.

Объект исследования – двигатели автотранспортных средств и системы беспроводной передачи данных.

Предмет исследования – оценка количества картерных газов, как прогнозирующий параметр технического состояния цилиндропоршневой

группы двигателей автотранспортных средств.

Методы исследования: при решении поставленных задач использовались математическое и физическое моделирование; методы планирования эксперимента и статистической обработки результатов измерений; факторный анализ; теория вероятностей; Марковские процессы теории надежности.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке математической модели прогнозирования изменения технического состояния узлов и агрегатов автотранспортных средств путем применения средств непрерывной диагностики и беспроводной передачи данных.

Теоретическая значимость результатов исследования заключается в разработке методики построения беспроводной системы непрерывного контроля параметров, характеризующих техническое состояние автотранспортного средства, и позволяющую на основе прогнозирования реализовать техническое обслуживание по фактическому состоянию.

Практическая значимость

Практическая значимость диссертационной работы заключается в разработке системы обслуживания автотранспортных средств на основе непрерывной диагностики и прогнозирования технического состояния узлов и агрегатов автотранспортных средств, с применением средств беспроводной передачи данных, корректировки регламента обслуживания техники, управления фондом запасных частей с целью снижения материальных затрат и повышения коэффициента готовности.

Реализация результатов исследования

Результаты исследований используются в процессе эксплуатации и при техническом обслуживании автотранспортных средств сельскохозяйственного назначения.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований рассмотрены и внедрены в ООО "Автогаз Инжиниринг", ОАО "Завод Старт", ООО "Тимер", что подтверждается соответствующими актами.

Результаты исследований используются при подготовке специалистов технического сервиса машин по правлению подготовки "Эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования", "Технический сервис в агропромышленном комплексе".

На защиту выносятся научно обоснованные модели прогнозирования и динамического процесса изменения технического состояния узлов и агрегатов автотранспортных средств, в том числе:

1. Математическая модель прогнозирования технического состояния узлов и агрегатов автотранспортных средств.

2. Способ и средства диагностирования технического состояния цилиндропоршневой группы двигателя.

3. Система сбора и передачи диагностических параметров с использованием беспроводных каналов связи для передачи данных.

4. Практические рекомендации по применению предложенного способа и средства диагностирования.

Апробация работы.

Основные результаты исследований докладывались на всероссийских и международных научно-практических конференциях: Актуальные проблемы научного знания. Новые технологии ТЭК-2023. Материалы VII Международной научно-практической конференции. Тюмень, 2023; Чтения академика В.Н. Болтинского, Москва, 2023; IV Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы научного знания. Новые технологии ТЭК-2023», г. Сургут; XXI Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы науки и образования в условиях современных вызовов», Москва, 2023; XII Международная научно-практическая конференция «Развитие современной науки и технологий в условиях трансформационных процессов», Москва, 2023.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 15 научных работах общим объемом 7,72 печатных листа, в том числе в 11 статьях (2 из них – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов диссертаций) и тезисов докладов, имеется 1 патент РФ на полезную модель, 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация включает введение, четыре главы, общие выводы, список используемых источников информации из 178 наименований, в том числе 15 на иностранном языке и приложения на 29 страницах. Объем диссертации – 180 страниц машинописного текста, в том числе 150 страниц основного текста, поясняется 4 таблицами и 36 рисунками.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, степень ее разработанности, новизна и практическая значимость, показаны цель и задачи исследований, дана краткая характеристика работы, а также изложены основные положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации работы и степени ее соответствия паспорту специальности, публикациях, структуре и объеме диссертации.

В первой главе представлено современное состояние и направления развития диагностики автотранспортных средств, а также рассмотрены основные подходы к оценке технического состояния по прогнозирующим параметрам.

При использовании транспортных средств неизбежно происходит деградация их функциональных характеристик и общего технического состояния, что влечет за собой различные неполадки и сбои.

Технический уровень транспортного средства определяется комплексным анализом трех основных компонентов: конструктивного исполнения, производственных возможностей и эксплуатационных характеристик. При этом среди эксплуатационных параметров ключевую роль играют два фундаментальных критерия - надежность и контролепригодность, которые выступают базовыми индикаторами при оценке технического состояния.

Надежность отражает способность транспортного средства сохранять свои функциональные характеристики в течение заданного периода, в то время как контролепригодность определяет удобство и эффективность проведения

диагностических процедур. Эти показатели взаимно дополняют друг друга, формируя целостную картину технического уровня машины и позволяя прогнозировать ее эксплуатационный ресурс.

Такой трехкомпонентный подход к оценке обеспечивает всестороннее понимание технического потенциала транспортного средства и позволяет принимать обоснованные решения по его техническому обслуживанию и эксплуатации.

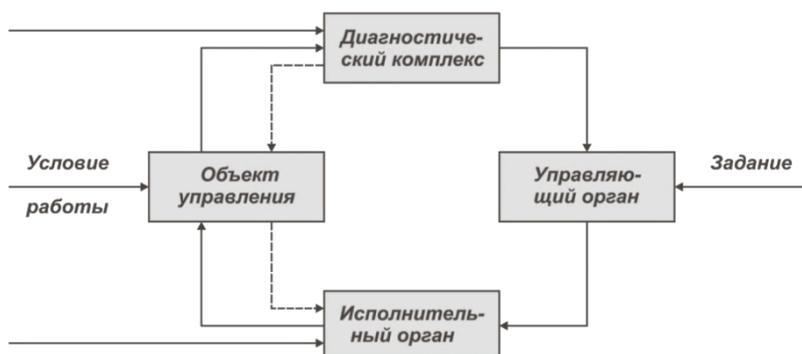


Рисунок 1 - Функциональная схема управления техническим состоянием транспортного средства

Современное развитие диагностических технологий позволяет переклассифицировать многие внезапные отказы в категорию постепенных. Такая классификация помогает подобрать оптимальные методы выявления неисправностей и прогнозирования остаточного ресурса оборудования.

Контроль технического состояния транспортного парка базируется на многофакторной системе критериев. В основе этой системы лежат ключевые индикаторы работоспособности, интервалы между сервисными мероприятиями, критические пороги диагностируемых величин, допустимые погрешности измерительных процедур, а также расчетный срок службы техники.

Значительное влияние диагностики на процессы технического обслуживания способствует эволюции системы от планово-предупредительной модели к обслуживанию, основанному на фактическом состоянии транспортных средств.

Такой подход к диагностике позволяет получить комплексную картину технического состояния объекта через анализ его реакций на различные типы воздействий.

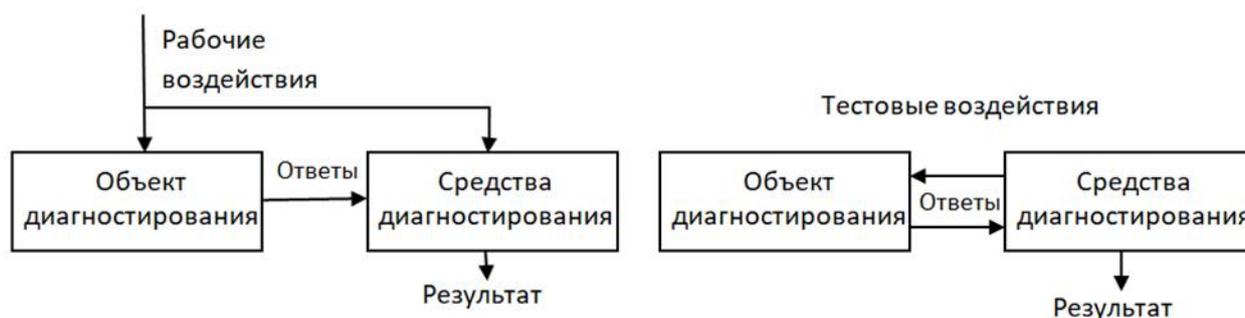


Рисунок 2 - Функциональные схемы систем диагноза технического состояния

При оценке технического состояния особую роль играют прогнозирующие параметры, которые не только характеризуют текущее техническое состояние по косвенным признакам, но и служат основой для

создания прогностических моделей изменения технического состояния транспортного средства.

Эффективность диагностических параметров определяется их чувствительностью к изменениям технического состояния.

Прогнозирование может осуществляться по различным критериям, включая усталостную прочность, износ, вибрационные характеристики, состав масла и экономические показатели.

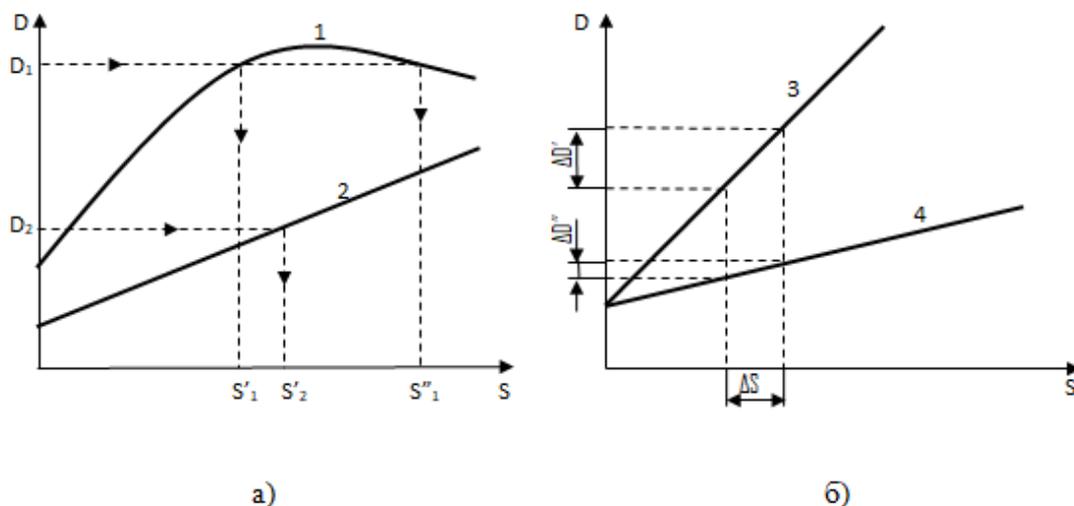


Рисунок 3 - Диаграмма однозначности (а) и широты измерения (чувствительности) (б) диагностических параметров D по отношению к структурному параметру S: 1 – неоднозначная зависимость; 2 – однозначная зависимость; 3 – более чувствительный; 4 – менее чувствительный ($\Delta D' > \Delta D''$).

На практике используют параметры, отвечающие требованиям однозначности, широты измерения, а также доступности и удобства измерения, информативности, технологичности. При этом в первую очередь следует учитывать параметры, которые характеризуют наиболее часто повторяющиеся отказы и неисправности.

Выбор ключевых диагностических параметров основывается на приоритетности показателей безопасности движения и экологического воздействия. Особое внимание уделяется характеристикам, отклонение которых влечет значительные затраты на восстановление.

При наличии альтернативных методов оценки предпочтение отдается наиболее информативным и экономически эффективным решениям. Оптимальными считаются параметры, обеспечивающие многофакторный контроль при минимальных измерительных затратах.

Методология И.А. Биргера, базирующаяся на формулах Байеса, предлагает научно обоснованный подход к селекции диагностических параметров через оценку их информативности в определении различных состояний системы.

Практическое применение метода включает идентификацию основных структурных и диагностических параметров, статистический анализ отказов и расчет вероятностных характеристик различных состояний системы. Такой

математический подход обеспечивает оптимальную селекцию диагностических параметров и повышает результативность диагностического процесса.

Формула Байеса:

$$p(D_i / K) = \frac{p(D_i)p(K_1 / D_i)...p(K_m / D_i)}{\sum_{S=1}^n p(D_S)p(K_1 / D_S)...p(K_m / D_S)} \quad (1)$$

где $p(D_i)$ – априорная вероятность состояний, определяемая как число объектов N_i , в которых обнаружены неисправности D_i , к общему числу исследуемых объектов; $p(K_j / D_i)$ – вероятность проявления j -го диагностического параметра при состоянии D_i .

Произведение $p(K_1 / D_i)...p(K_m / D_i)=p(K / D_i)$, если

$$\sum_{i=1}^n p(D_i / K) = 1, \quad (2)$$

и диагностические параметры K_i являются независимыми для каждого из состояний D_i .

Знаменатель формулы представляет собой вероятность $p(K)$ того, что в диагностируемом объекте должен обнаруживаться комплекс диагностических параметров K . Так как комплекс K проявляется как минимум с одним из состояний D_i , то полная вероятность:

$$p(K) = \sum_S^n p(D_S)p(K / D_S), \quad (3)$$

Техническая оценка современных транспортных средств представляет собой многогранную проблему, охватывающую широкий спектр устройств - от традиционной механики до сложной электроники.

Диагностика с применением беспроводных систем передачи данных

Современные технологии позволяют создать особый тип сетевой инфраструктуры - беспроводную сенсорную сеть, представляющую собой автономную систему взаимосвязанных датчиков и исполнительных механизмов, коммуницирующих по радиоканалам.

Радиус действия такой сети варьируется от нескольких метров до километровых расстояний, что достигается благодаря механизму последовательной передачи данных между узлами.

Основу беспроводных сенсорных сетей составляют компактные вычислительные модули - моты, оснащенные разнообразными сенсорами (для измерения температуры, давления, освещенности, вибрации, определения местоположения) и радиопередающими устройствами определенного диапазона.

Технология ZigBee выделяется среди других коммуникационных протоколов благодаря своей адаптивной структуре и экономичности установки. Особенно значимым преимуществом становится возможность объединения в единую сеть внушительного количества устройств - до 65 000 элементов, что существенно превосходит возможности альтернативных проводных и беспроводных решений.

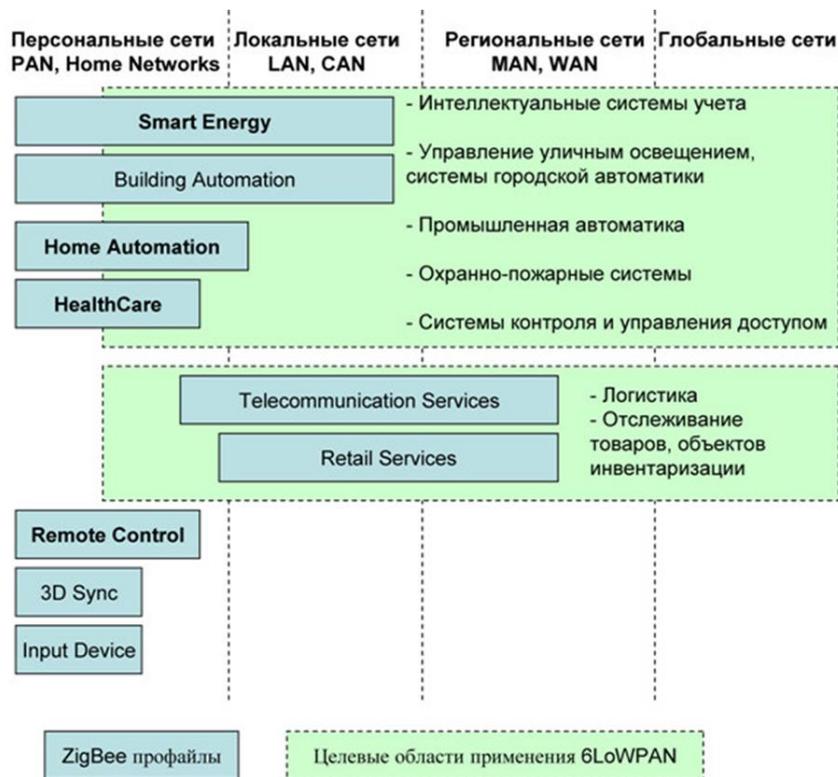


Рисунок 4 - Область применения беспроводных систем измерения

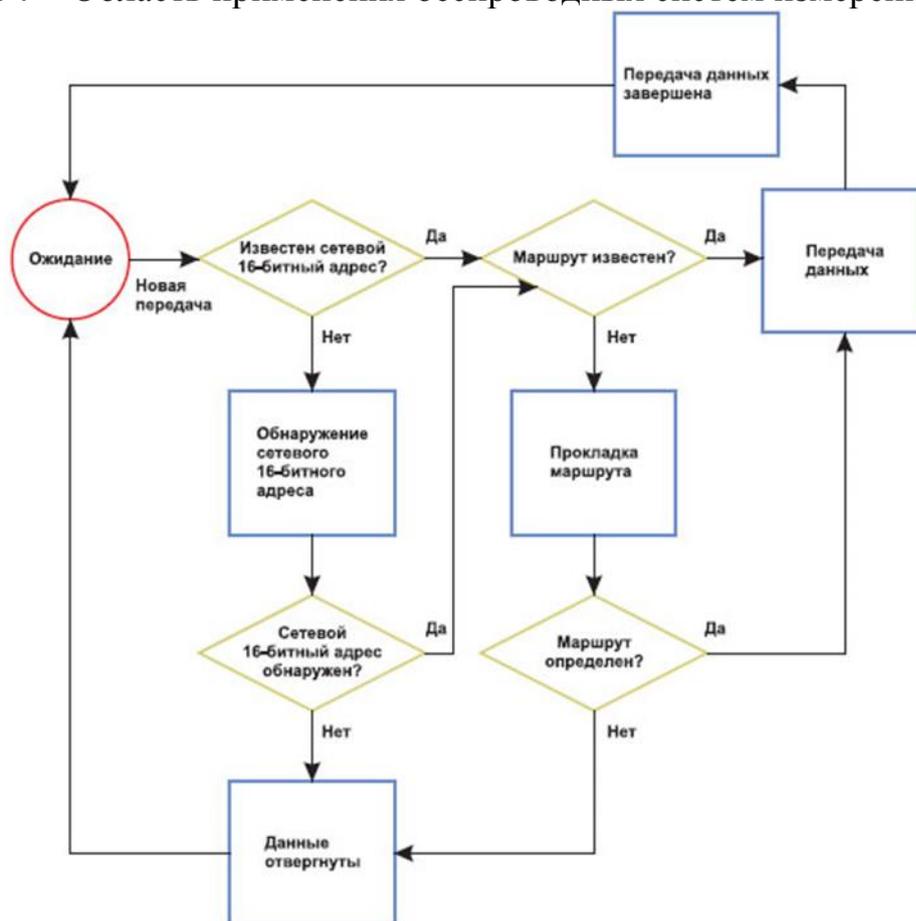


Рисунок 5 - Алгоритм передачи пакета данных

В наши дни наблюдается устойчивая тенденция к замещению традиционных проводных систем беспроводными решениями в области телеметрии, удаленной диагностики и информационного обмена. Этому способствует постоянное удешевление беспроводных технологий при

одновременном улучшении их технических характеристик.

Узловые элементы такой сети представляют собой комплексные устройства, включающие сенсорные компоненты для мониторинга, вычислительный модуль и приемопередающее оборудование. Такая архитектура обеспечивает возможность локальной обработки полученных данных и поддержания коммуникации с центральной информационной системой.

Протокол 802.15.4/ZigBee, реализующий технологию ближней ретранслируемой радиосвязи, стал ключевым решением в развитии современных самоорганизующихся распределенных систем мониторинга и управления.

Отличительной особенностью сетей ZigBee является использование ячеистой (mesh) топологии, позволяющей устройствам взаимодействовать как напрямую, так и через промежуточные узлы, формируя гибкую и надежную коммуникационную структуру.



Рисунок 6 – Топология сенсорной сети

Современные беспроводные сенсорные сети представляют собой уникальную технологию, способную обеспечить длительный мониторинг и контроль в системах с критичными требованиями к автономности датчиков. Такие сети формируют самоорганизующуюся распределенную инфраструктуру, осуществляющую сбор, обработку и трансляцию данных. Их главное предназначение - мониторинг физических параметров окружающей среды и различных объектов [149].

Вторая глава посвящена теоретическому обоснованию разработки метода и средств оценки остаточного ресурса узлов и агрегатов автотранспортных средств.

Методы диагностирования автомобилей подразделяются на три основные группы, каждая из которых имеет свою специфику применения и особенности реализации.

Методы диагностики первой группы построены на имитации реальных эксплуатационных условий работы автомобиля. В ходе диагностики проводится измерение рабочих характеристик в строго регламентированных

условиях с последующим сравнением полученных результатов с нормативными показателями. Процедура может выполняться как на специализированных стендовых установках, оснащенных беговыми барабанами, так и в процессе штатной эксплуатации транспортного средства. Подобный подход позволяет провести всестороннюю оценку технического состояния как автомобиля в целом, так и отдельных его узлов.



Рисунок 7 – Методы диагностирования автомобилей

Вторая группа объединяет диагностические методы, основанные на анализе сопутствующих процессов. Ключевое значение в этой группе имеет проверка герметичности рабочих полостей. Методика предполагает создание в диагностируемом объеме повышенного давления или вакуума с последующим мониторингом динамики их изменения. Такой диагностический подход демонстрирует особую эффективность при обследовании цилиндропоршневой группы силового агрегата и пневматической системы тормозов.

Третья группа методов прямых измерений геометрических параметров, включающих оценку зазоров, люфтов и отклонений. Основным ограничением данного подхода является необходимость физического доступа к измеряемым элементам конструкции.

При выборе диагностических параметров необходимо учитывать, что разные параметры в различной степени соответствуют требованиям к

диагностическим показателям. Поэтому процесс их определения для сложных систем требует системного подхода.

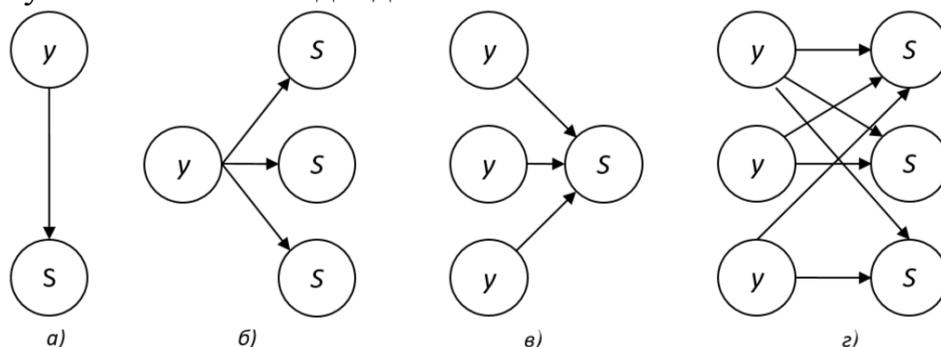


Рисунок 8 – Возможные связи между структурными и диагностическими параметрами: *а* - единичные; *б* - множественные; *в* - неопределенные; *г* - комбинированные

Процесс определения диагностических параметров инициируется с создания исчерпывающего перечня потенциальных индикаторов. Ключевым инструментом на этом этапе выступает структурно-следственная схема, реализованная в виде графической модели исследуемого механизма или узла. Данное представление интегрирует в единую систему базовые компоненты механизма, их конструктивные характеристики, распространенные дефекты, подлежащие обнаружению, и возможные диагностические показатели.



Рисунок 9 – Структурно-следственная схема цилиндропоршневой группы двигателя как объекта диагностирования

Такой комплексный подход обеспечивает научно обоснованный выбор диагностических параметров и повышает эффективность диагностики в целом.

На основе инженерного анализа объекта и структурно-следственной схемы формируется первичный перечень диагностических параметров с установлением их взаимосвязей со структурными параметрами и возможными неисправностями. Далее производится селекция наиболее значимых параметров

путем их оценки по ключевым критериям: однозначность; стабильность; чувствительность; информативность. В таких случаях используются диагностические матрицы, представляющие собой структурированные логические схемы, устанавливающие взаимосвязи между контролируемыми параметрами S и потенциальными дефектами A (Таблица 1).

Таблица 1 – Диагностическая матрица

Диагностические параметры	Возможные неисправности		
	A ₁	A ₂	A ₃
S ₁	1	0	0
S ₂	0	1	0
S ₃	1	0	1
S ₄	0	1	1

Система технической диагностики оперирует диагностической матрицей, построенной на двоичной логике, где присутствие потенциальной неисправности обозначается единицей, а её отсутствие - нулем. Матрица иллюстрирует процесс выявления трех различных неисправностей посредством анализа четырех диагностических показателей. Механизм диагностики базируется на установлении соответствия между определенными комбинациями отклонившихся параметров и специфическими неисправностями: отклонения S₁ и S₃ свидетельствуют о неисправности A₁, аномальные значения S₂ и S₄ указывают на A₂, а совместное отклонение S₃ и S₄ характерно для A₃.

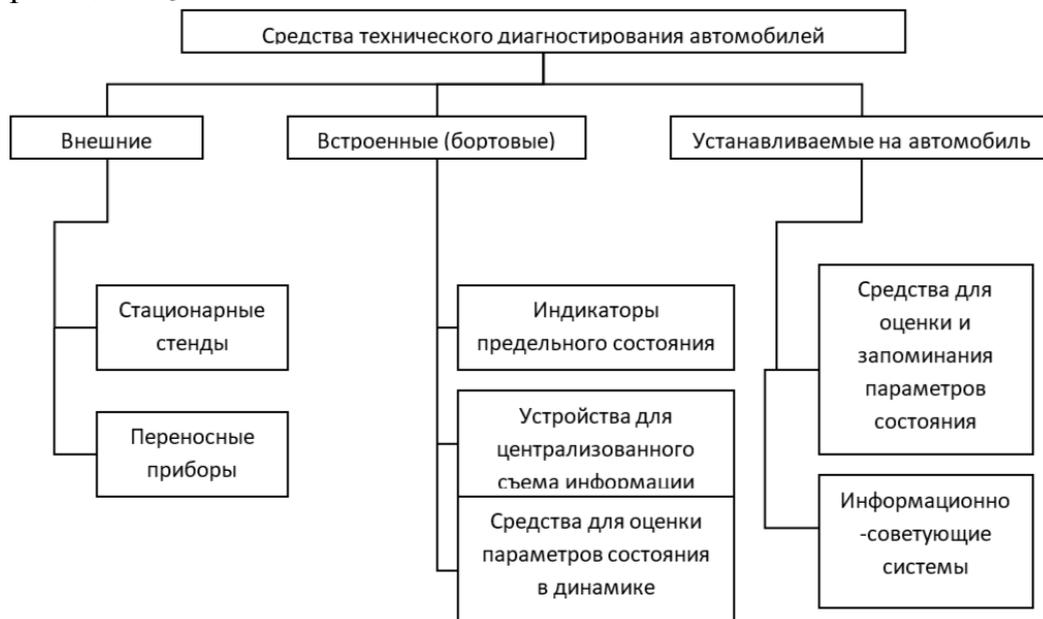


Рисунок 10 – Классификация средств технического диагностирования автотранспортных средств

Актуальные средства технического диагностирования (СТД) представляют собой интегрированные системы, объединяющие различные функциональные блоки: генераторы тестовых сигналов, измерительные сенсоры, регистрирующую аппаратуру, системы визуализации данных и автоматизированные комплексы управления с аналитическими возможностями. Согласно принципу взаимодействия с диагностируемым объектом, СТД подразделяются на три основные категории. При этом диагностические

матрицы выступают фундаментальной основой для разработки автоматизированных логических систем, внедряемых в современное диагностическое оборудование.

В третьей главе представлено планирование эксперимента и результаты исследований.

Развитие техники обуславливает потребность в управлении состоянием сложных систем, включая переключение на резервные элементы и изменение режимов работы, что невозможно без прогнозирования. Таким образом, появляется новая задача – прогнозирование технического состояния. Для таких систем, как транспортные и производственные, необходимо не только констатировать их исправность в текущий момент, но и гарантировать их работоспособность на протяжении определенного будущего интервала времени.

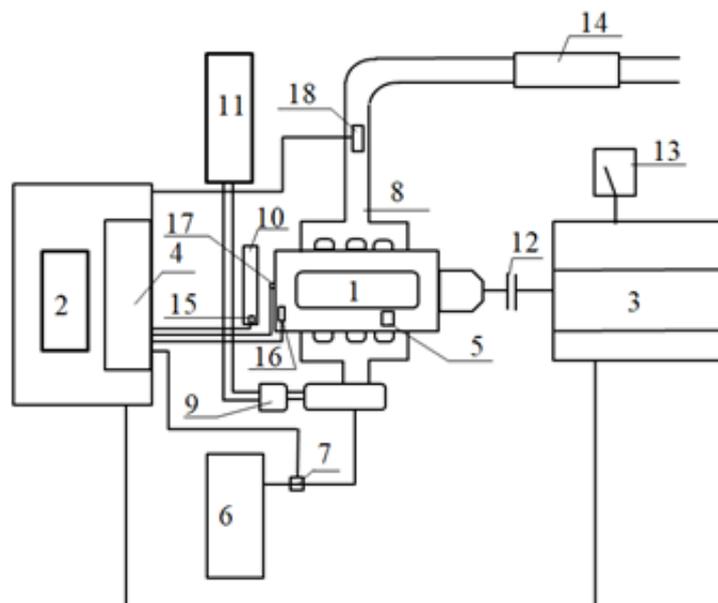
Приведено описание конструкции системы оценки цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания. Исследования проводились на двигателях УМЗ 4216-170. Частота вращения коленчатого вала двигателя варьировалась от 750 мин⁻¹ до 4200 мин⁻¹. Использовался бензин неэтилированный марки АИ-92-К2 (К5) по ГОСТ 32513- 2013.

В процессе исследований производили изменение частоты вращения коленчатого вала двигателя и снимали показания расходомера картерных газов в виде вольтамперной характеристики. Показания расходомера картерных газов фиксировались для частоты вращения коленчатого вала двигателя 1000, 1500, 1800, 2000, 2200, 2500, 3000, 3500, 4000, 4200 мин⁻¹.

По результатам исследований была разработана методика определения нормативных значений количества картерных газов, как косвенного параметра технического состояния цилиндропоршневой группы двигателя.

Для косвенной оценки технического состояния цилиндропоршневой группы 12 двигателей УМЗ 4216-170 построены математические зависимости с достоверности аппроксимации $R^2 = 0,97$.

При анализе данных, полученных в результате проведенных экспериментальных исследований 12 новых двигателей УМЗ 4216-170, установлено, что отклонение от средних значений вольтамперной характеристики расходомера картерных газов составляло $\pm 13,04\%$, и можно говорить о чувствительности данного параметра, при оценке технического состояния цилиндропоршневой группы. Разработанная методика непрерывной диагностики двигателей автотранспортных средств по прогнозирующим параметрам является универсальной и может быть применима для различных узлов и агрегатов автотранспортных средств.



1 – двигатель; 2 – пульт управления стендом; 3 – стенд для испытания двигателя; 4 – панель приборов от датчиков на двигателе; 5 – система контроля расхода картерных газов; 6 – топливный бак; 7 – устройство для замера расхода топлива; 8 – система выпуска отработанных газов; 9 – воздушный фильтр; 10 – система охлаждения двигателя; 11 – ресивер для воздуха; 12 – муфта соединения двигателя со стендом; 13 – балансирный динамометр; 14 – глушитель; 15 – индикатор температуры системы охлаждения двигателя; 16 – индикатор давления масла в двигателе; 17 – электронный тахометр; 18 – газоанализатор.

Рисунок 11 – Схема установки системы непрерывной оценки технического состояния цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания

Материалы и методы. Экспериментальная часть работы выполнялась с использованием двигателей модели УМЗ 4216-170, что отражено на рис. 3.2 а, б. Испытания осуществлялись путем монтажа двигателя на тормозном стенде модели MEZ Vsetin 926-4/V (стенд 1).



Рисунок 12 – Общий вид стенда и двигателя

Схема устройства непрерывной оценки технического состояния цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания

Разработанное техническое решение предлагает новый способ диагностики цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания, основанный на оценке состояния поршневых колец по объему картерных газов, при этом отличительной особенностью является отсутствие необходимости определения эталонных значений, так как они определяются индивидуально для каждого двигателя с момента начала его эксплуатации.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получена математическая модель, описывающая параметрическую надежность двигателя на основании изменения прогнозирующего параметра. Методика экспериментального исследования соответствовала ГОСТ 14846-81.

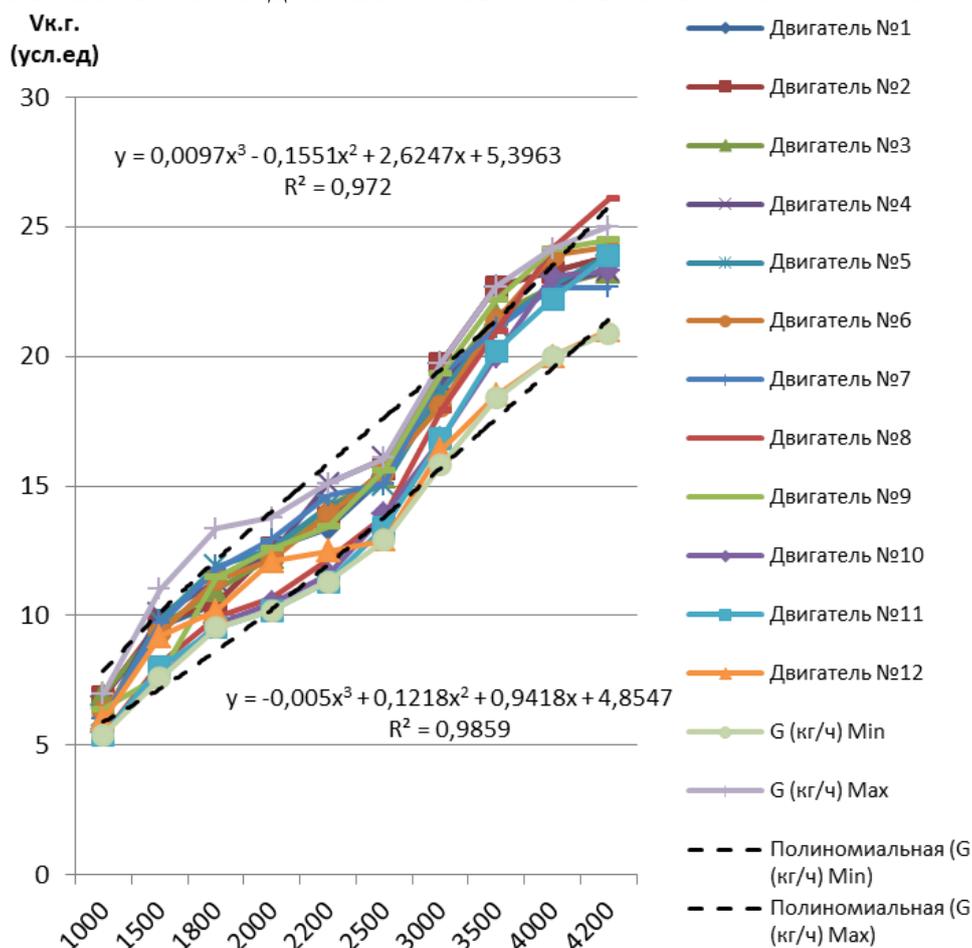


Рисунок 13 – График мощности двигателей УМЗ 4216-170 и полиномиальные линии аппроксимации максимальных и минимальных значений

Полиномиальная аппроксимация максимальных значений картерных газов двигателей может быть записана уравнением:

$$y = 0,0097x^3 - 0,1551x^2 + 2,6247x + 5,3963 \quad (4)$$

Величина достоверности аппроксимации

$$R^2 = 0,972$$

Полиномиальная линия аппроксимации минимальных значений картерных газов двигателей может быть записана уравнением:

$$y = -0,005x^3 + 0,1218x^2 + 0,9418x + 4,8547 \quad (5)$$

Величина достоверности аппроксимации

$$R^2 = 0,9859$$

На рисунке 3.4 представлен график среднего значения расхода картерных газов 12 двигателей УМЗ 4216-170.

Вк.г.
(усл.ед)

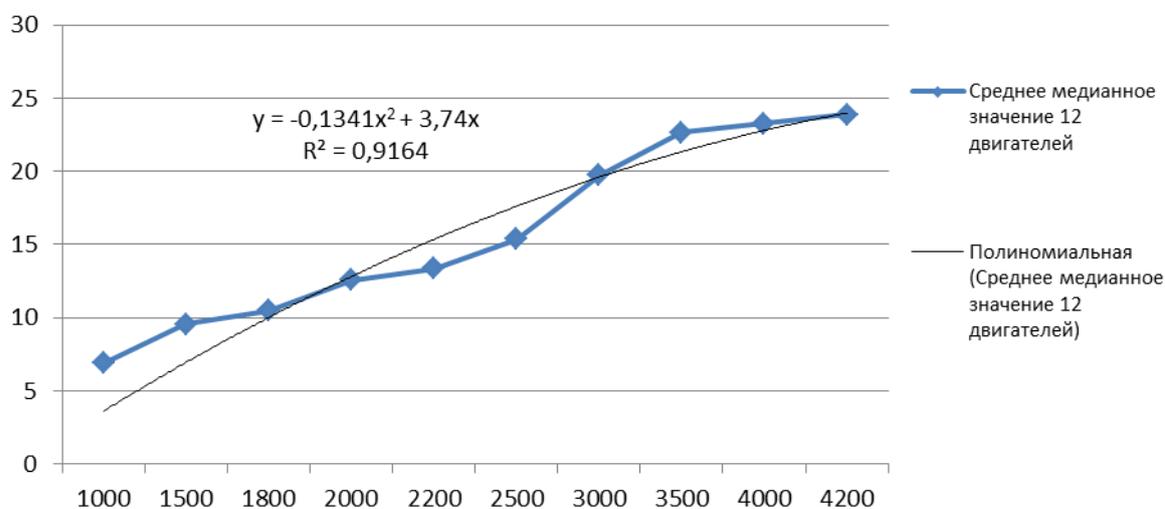


Рисунок 14 – Полиномиальная аппроксимация по методу наименьших квадратов построенная по медианному значению расхода картерных газов 12 двигателей УМЗ 4216-170

Результат, достигаемый с помощью данного решения, заключается в обеспечении непрерывного контроля за техническим состоянием цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания.

В процессе эксперимента посредством пульта управления стендом задается требуемая частота вращения коленчатого вала двигателя в режиме его работы без нагрузки. При этом, в соответствии с планом эксперимента, снимались показания вольтамперной характеристики для каждой определенной частоты вращения коленчатого вала двигателя.

Проверка соответствия экспериментальных результатов нормальному распределению осуществлялась двумя способами: расчетом нормальных меток и визуализацией через построение вероятностных диаграмм нормального распределения (normal probability plot).

Развитие беспроводных технологий открывает новые перспективы в сфере технического обслуживания и диагностики автотранспортных средств. Цель исследования состоят в изучении возможностей практического применения ZigBee технологии беспроводной передачи данных для решения задач непрерывной диагностики агрегатов автотранспортных средств.

Передача данных от системы непрерывной оценки технического состояния цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания осуществлялась посредством ZigBee технологии беспроводной передачи данных (рисунок 15).

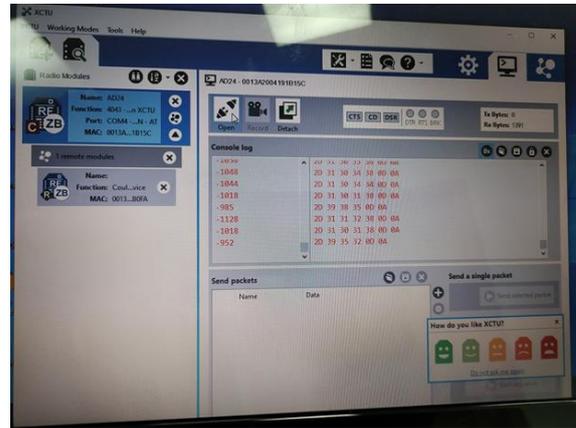
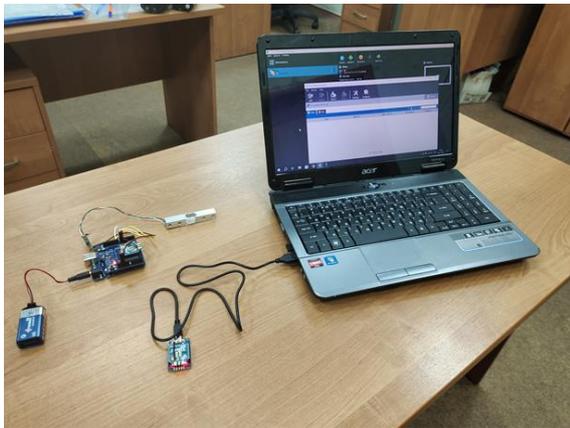


Рисунок 15 – Процесс беспроводной передачи данных от измерительного устройства на блок обработки данных

Оценка остаточного ресурса технической системы с учетом динамики изменения диагностических параметров проводилась на основании разработанной математической модели оценки количества картерных газов.

В четвертой главе представлена технико-экономическая оценка и практические рекомендации по использованию результатов исследования.

Технико-экономическая оценка проводилась на примере парка машин состоящего, в том числе, из 43 автомобилей Газель NEXT A21R32 (двигатель УМЗ 4216-170). Годовая экономия определялась по формуле:

$$\mathcal{E}_Г = (Z_{кр} - Z_{пгд} - I_{ст}) W_{кр} \quad (6)$$

где: $Z_{кр}$ – затраты на капитальный ремонт двигателей; $Z_{пгд}$ – затраты на устранение неисправностей, связанных с выходом из строя цилиндро-поршневой группы, руб.; $I_{ст}$ – дополнительные затраты, связанные с мониторингом количества картерных газов с применением предложенной методики; $W_{кр}$ – годовая программа капитальных ремонтов, шт.

Срок окупаемости определим по формуле:

$$T_o = \frac{K}{\mathcal{E}_Г}, \quad (7)$$

где: K – капитальные вложения, руб.

Срок окупаемости составил 2,7 года

Оценка надежности системы непрерывной диагностики проводилась на базе математической модели «RADC-EK-89-177», и был разработан расчетный алгоритм для определения безотказности системы диагностики во время эксплуатации, с использованием симулятора Сооја.

Разработанная методика дистанционного автоматизированного диагностирования технического состояния включает следующие этапы, показанные на рисунке 16.

В блоке обработки информации сигнал подвергается сопоставлению с эталонными значениями и устанавливается природа возникновения отклонения сигнала от эталонного значения.

Данные, полученные по итогам обработки сигнала, визуализируются посредством вывода информации об остаточном ресурсе до проведения очередного технического обслуживания или возникновении неисправности на внешний носитель – дисплей в кабине водителя.



Рисунок 16 – Методика непрерывного диагностирования технического состояния узлов и агрегатов автотранспортных средств

Данная методика позволяет в реальном времени отслеживать фактическое техническое состояние автотранспортных средств, оценивать остаточный ресурс агрегатов (механизмов) не допуская потери работоспособного состояния.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Проанализированы способы и обоснована необходимость оценки эксплуатационной надежности двигателей с целью коррекции интервалов их технического обслуживания и ремонта. Получены нормативные значения максимальных и минимальных значений картерных газов, косвенно характеризующих техническое состояние цилиндро-поршневой группы двигателя УМЗ 4216-170 и построены полиномиальные аппроксимации граничных значений с достоверностью $R^2 = 0,9859$.

2. Разработанное устройство непрерывной оценки технического состояния цилиндро-поршневой группы двигателя внутреннего сгорания (Патент на полезную модель RU 223207), в совокупности с техническими средствами, использующими беспроводные каналы передачи данных посредством сети Zigbee с ячеистой mesh - топологией, позволяют создавать диагностические системы с широким набором контролируемых параметров.

3. Применение математических моделей для выбора оптимальных сроков проведения плановых восстановительных работ и разработанного программного комплекса оценки остаточного ресурса технической системы с учетом динамики изменения диагностических параметров (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024666051), позволяет увеличить коэффициент готовности парка машин.

4. Проведённый расчет годовой экономии средств при использовании системы непрерывной оценки технического состояния цилиндро-поршневой группы двигателя показал целесообразность ее внедрения. При внедрении системы на примере автопарка численностью 43 единицы срок окупаемости составил 2,7 года.

5. Разработанные научно обоснованные рекомендации по совершенствованию системы технического обслуживания с применением средств непрерывной диагностики позволяют повысить организационно-технический уровень обслуживания и снизить затраты при сохранении уровня готовности автотранспортных средств.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Юденичев, А.Н. Применение беспроводных систем передачи данных при решении задач непрерывной диагностики агрегатов автотранспортных средств / А.Н. Юденичев, Д.В. Варнаков, И.С. Паршин // Техника и оборудование для села. – 2025. – № 1. – С. 16–17.

2. Юденичев, А.Н. Непрерывная диагностика двигателей автотранспортных средств по прогнозирующим параметрам / Д.В. Варнаков, А.Н. Юденичев, Е.А. Варнакова // Техника и оборудование для села. – 2025. – № 1. – С. 18–21.

Авторские свидетельства, патенты:

3. Патент на полезную модель RU 223207 U1 Российская Федерация. Устройство непрерывной оценки технического состояния цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания / А.Н. Юденичев, Д.В. Варнаков, В.В. Варнаков, А.С. Неваев, Д.Л. Сергеев, О.А. Ерёмин.

4. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024667892 Российская Федерация. Прогнозирование остаточного ресурса технической системы по диагностическим параметрам: № 2024667407: заявл. 31.07.2024; опубл. 31.07.2024 / А.Н. Юденичев, Д.В. Варнаков, С.В. Гришин, Е.П. Бормотина, Д.О. Фадеев, И.М. Мухин.

5. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024666052 Российская Федерация. Оценка динамических параметров автотранспортных средств в процессе их эксплуатации: № 2024665573: заявл. 09.07.2024; опубл. 09.07.2024 / А.Н. Юденичев, Д.В. Варнаков, В.В. Варнаков, Е.П. Бормотина, Д.О. Фадеев, И.М. Мухин.

6. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024666051 Российская Федерация. Оценка остаточного ресурса технической системы с учетом динамики изменения диагностических параметров: № 2024665572: заявл. 09.07.2024; опубл. 09.07.2024 / А.Н. Юденичев, Д.В. Варнаков, Е.И. Кобаков, Е.П. Бормотина, Д.О. Фадеев, И.М. Мухин.

Публикации в сборниках научных трудов и материалах конференций:

7. Юденичев, А.Н. Разработка методов контроля параметров и расширение компонентной базы при реализации цифровых технологий / А.Н.

- Юденичев, Д.В. Варнаков, А.В. Бугаев // В сборнике: Чтения академика В. Н. Болтинского. Сборник статей. - Москва, 2023. - С. 78-84.
8. Юденичев, А.Н. Разработка метода оценки эффективности функционирования сложных технических систем / А.Н. Юденичев, Д.В. Варнаков, А.В. Бугаев // Чтения академика В. Н. Болтинского. Сборник статей. Москва. – 2023 - С. 98-104.
9. Юденичев, А.Н. Влияние нефтегазовой отрасли на экологию северных регионов России / А.Н. Юденичев, А.С. Неваев // В сборнике: Актуальные проблемы научного знания. Новые технологии ТЭК-2023. Материалы VII Международной научно-практической конференции. Отв. редактор С.Н. Нагаева - Тюмень, 2023. - С. 135-138.
10. Юденичев, А.Н. Особенности обеспечения экологической безопасности в нефтегазовой сфере / А.Н. Юденичев, Д.В. Варнаков // В сборнике: Актуальные проблемы научного знания. Новые технологии ТЭК-2023. Материалы VII Международной научно-практической конференции. Отв. редактор С.Н. Нагаева - Тюмень, 2023.- С. 132-135.
11. Юденичев, А.Н. Выбор метода ремедиации почвы, загрязненной нефтепродуктами / Д.В. Варнаков, А.Н. Юденичев, А.С. Неваев // В сборнике: Актуальные проблемы науки и образования в условиях современных вызовов. Сборник материалов XXI Международной научно-практической конференции - Москва, 2023. - С. 152-157.
12. Юденичев, А.Н. Анализ возможных источников загрязнения окружающей природной среды нефтепродуктами / Д.В. Варнаков, А.Н. Юденичев, А.С. Неваев // В сборнике: Актуальные проблемы науки и образования в условиях современных вызовов. Сборник материалов XXI Международной научно-практической конференции - Москва, 2023. - С. 158-164.
13. Юденичев, А.Н. Биовосстановление земель загрязненных нефтепродуктами / Д.В. Варнаков, А.Н. Юденичев, А.С. Неваев // В сборнике: Развитие современной науки и технологий в условиях трансформационных процессов. сборник материалов XII Международной научно-практической конференции - Санкт-Петербург, 2023. - С. 169-175.
14. Юденичев, А.Н. Методика количественного контроля загрязнений нефтепродуктами почвы и воды / Д.В. Варнаков, А.Н. Юденичев, А.С. Неваев // В сборнике: Развитие современной науки и технологий в условиях трансформационных процессов. сборник материалов XII Международной научно-практической конференции - Санкт-Петербург, 2023. - С. 176-180.
15. Юденичев, А.Н. Проактивная система технического обслуживания с применением дистанционной диагностики транспортных средств / А.Н. Юденичев, Д.В. Варнаков, Е.П. Парлюк // В сборнике: Чтения академика В. Н. Болтинского. Сборник статей - Москва, 2024. - С. 121-130.