



САВИН ЛЕОНИД ОЛЕГОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
И РЕМОНТА ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО
ТРАНСПОРТА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Специальность 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева».

Научный руководитель: **Новиков Александр Николаевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Зяц Юрий Александрович**,
доктор технических наук, доцент
ФГКВОУ ВО «Рязанское гвардейское высшее воздушно-десантное ордена Суворова дважды Краснознаменное командное училище имени генерала армии В.Ф. Маргелова» МО РФ, доцент кафедры математических и естественнонаучных дисциплин.

Терентьев Алексей Вячеславович,
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», профессор кафедры наземных транспортно-технологических машин.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»**

Защита состоится «24» марта 2022 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.032.03 на базе ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева» по адресу: 302030, г. Орёл, ул. Московская, д. 77, ауд. 426.

С диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте ФГБОУ ВО «ОГУ имени И. С. Тургенева» (<http://oreluniver.ru>) и в фундаментальной библиотеке по адресу: 302028, г. Орёл, пл. Каменская, д. 1.

Автореферат разослан «__» _____ 2022г. Объявление о защите диссертации и автореферат диссертации размещены в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «ОГУ имени И. С. Тургенева» (<http://oreluniver.ru>) и на официальном сайте Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (www.vak.minobrnauki.gov.ru).

*Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации, в двух экземплярах направлять в диссертационный совет 99.2.032.03 по адресу:
302030, г. Орёл, ул. Московская, д. 77, тел.: +79606476660,
e-mail: srmostu@mail.ru*

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент



Васильева В. В.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Периодичность и объем операций, проводимых при техническом обслуживании автомобильного транспорта (АТ) разрабатывается, как правило, применительно к усредненным условиям эксплуатации, при этом не всегда учитываются различные условия эксплуатации, к которым относятся высокие и низкие температуры, запыленность и влажность воздуха, повышенная агрессивность окружающей среды, интенсивные атмосферные осадки и ветровая нагрузка, дорожные условия и рельеф местности, порядок организации перевозок, и т. п. При этом большая часть указанных факторов является по своей природе случайной, а их влияние на техническое состояние АТ приводит к постепенному изменению состояния агрегатов АТ (с течением времени) и в конечном итоге – к отказу АТ. Очевидно, что все представленные условия эксплуатации АТ в своей совокупности оказывают достаточно существенное влияние на надежность одного из важнейших агрегатов АТ – двигателя внутреннего сгорания (ДВС).

Надежность ДВС обеспечивается, в первую очередь, его техническим состоянием, которое обуславливается совокупностью изменяющихся свойств деталей, узлов и характеризуется значением их параметров. На техническое состояние ДВС АТ в различных условиях эксплуатации оказывает воздействие множество различных механических, физических и химических факторов (внешних и внутренних). При этом большая часть таких факторов является по своей природе случайной, а их влияние приводит к постепенному изменению значений различных параметров ДВС.

Снижение надежности АТ при ее эксплуатации в различных условиях должно учитываться ресурсным и оперативным корректированием соответствующих нормативов технической эксплуатации, обеспечивающим поддержание состояния АТ в пределах нормы в течение заданного срока службы с учетом воздействия случайных внешних факторов. При этом особенно актуальными данные вопросы оказываются для специальной АТ, для которой важность выполнения поставленной задачи на практике часто оказывается неизмеримо важнее, чем обеспечение ее надежности [6].

Степень разработанности темы исследования. О важности и актуальности данного направления свидетельствует достаточно большое количество работ по данной теме. Так, влияние природно-климатических и сезонных условий на надежность АТ в целом исследовалось в трудах Р. С. Григорьева, В. Л. Игнатова, А. М. Ишкова, К. К. Прокопьева, В. П. Степанова. Схожие вопросы, но уже для отдельных узлов и агрегатов АТ, рассматривались в работах Г. С. Лосавио, А. И. Яговкина. Проблемы обеспечения надежности АТ в особых условиях эксплуатации применительно к конкретным типам (маркам) АТ изучались Г. В. Абакумовым, Р. С. Григорьевым, Н. С. Захаровым, М. А. Кузьминовым, Ю. М. Першиным (для автомобилей Урал, МАЗ, КраЗ и БелАЗ), а также В. В. Ионовым, П. П. Ощепковым (для автомобилей КамАЗ). Вопросы, касающиеся повышения надежности АТ при ее эксплуатации в отдельных регионах РФ, исследовались в работах Р. Р. Зинатуллина, С. Г. Павлишина (Дальний Восток), В. Р. Кузьмина (в условиях Севера), Е. В. Агеева (в условиях жаркого климата) и ряда других авторов. Влияние транспортных и дорожных условий эксплуатации на надежность АТ рассматривалось в диссертациях А. И. Петрова, Л. Г. Резника, публикациях А. И. Туленова, Н. Н. Чуклинова, а также других ученых. Однако проблема обеспечения надежности ДВС АТ при эксплуатации в различных условиях в настоящее время окончательно не решена, а имеющиеся по данной теме работы носят, по большей части, частный характер и посвящены исследованию лишь ее отдельных аспектов. В них не показана возможность использования уже существующих статистических данных для разработки математических моделей случайного процесса постепенного изменения во

времени контролируемых параметров АТ, позволяющих осуществить прогнозирование времени выхода этих параметров за допустимые пределы (момента отказа) с любой заданной вероятностью, а также решение обратной задачи – нахождения вероятности безотказной работы АТ на заданном интервале времени. Недостаточная проработанность данных вопросов, в свою очередь, часто приводит к отсутствию научно обоснованных значений оптимальной периодичности контроля параметров критичного (наиболее подверженного влиянию тех или иных конкретных условий эксплуатации) агрегата АТ – ДВС, оказывающего наибольшее влияние на работоспособность АТ, и в конечном итоге – к недостаточной обоснованности гибких стратегий технического обслуживания (ТО) ДВС и АТ в целом [1–3].

Таким образом, при использовании АТ в различных условиях эксплуатации существует объективное противоречие (несоответствие) между существованием жестко заданных параметров проведения ТО АТ при плановой стратегии ее обслуживания, рассчитанной для усредненных условий, с одной стороны, и отсутствием учета условий эксплуатации при гибкой стратегии ТО АТ, позволяющей обеспечить ее надежность, – с другой. В результате рассчитанные для типовых условий эксплуатации сроки проведения ТО, приведенные в технической документации, часто оказываются недостаточно обоснованными. Это обстоятельство существенно снижает готовность АТ при эксплуатации за счет недостаточно полного учета реального технического состояния объектов контроля, а также повышает непроизводительные затраты на использование по назначению (ремонт и восстановление работоспособности) АТ.

Цель и задачи исследования.

Целью работы является совершенствование гибкой стратегии ТО ДВС для обеспечения готовности АТ при эксплуатации. Для достижения цели работы были поставлены следующие **задачи**:

1. Анализ факторов, влияющих на надежность ДВС АТ при эксплуатации, а также информативных параметров (ИП), постепенное изменение которых в различных условиях эксплуатации может привести к отказу ДВС и в результате – к снижению готовности АТ.
2. Выбор и обоснование показателей эффективности функционирования ДВС (показателя готовности и затрат на эксплуатацию), зависящих от периодичности проведения ТО ДВС.
3. Разработка вероятностных моделей постепенного изменения с течением времени информативных параметров ДВС АТ при функционировании в различных условиях.
4. Разработка алгоритма определения оптимальной периодичности ТО ДВС.
5. Разработка методики проведения ТО ДВС АТ в различных условиях эксплуатации.
6. Разработка научно-технических предложений по применению разработанного методического инструментария при организации ТО ДВС.

Объектом исследования является двигатель внутреннего сгорания АТ в процессе эксплуатации.

Предметом исследования является процесс постепенного изменения с течением времени значений информативных параметров ДВС АТ, эксплуатируемого в различных условиях.

Научная новизна исследования:

- разработаны вероятностные модели постепенного изменения контролируемых параметров ДВС, учитывающие условия эксплуатации и позволяющие определить время достижения параметрами своих предельных значений;
- на основе статистических данных впервые получены зависимости удельного коэффициента готовности от периодичности проведения ТО ДВС, в различных условиях эксплуатации;

– получены зависимости для корректирования сроков проведения технического обслуживания ДВС от условий эксплуатации при использовании нового подхода для определения наработки.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Предложено использование квазидетерминированного (КД) моделирования для прогнозирования постепенного изменения контролируемых параметров ДВС для определения сроков проведения ТО при эксплуатации АТ в различных условиях.

2. Разработан и внедрен алгоритм определения оптимальной периодичности ТО ДВС на основе результатов анализа и моделирования процесса постепенного изменения информативных параметров, позволяющий достичь компромисса между разнородными показателями эффективности функционирования – коэффициентом готовности и затратами на эксплуатацию [17,18];

3. Разработана и внедрена методика проведения ТО ДВС АТ в различных условиях эксплуатации, позволяющая либо минимизировать затраты на эксплуатацию АТ при выполнении требований по ее надежности (прямая задача), либо обеспечить максимально возможное значение коэффициента готовности АТ при заданных ограничениях на затраты (обратная задача).

Методология и методы исследования. Решение научной задачи основывается на использовании метода КД-моделирования случайных процессов, методов математической статистики и теории вероятностей (в частности, методов вероятностного прогнозирования надежности), системного анализа, а также теории эффективности целенаправленных процессов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа факторов, влияющих на надежность агрегатов АТ при эксплуатации в различных условиях.

2. Вероятностные модели изменения с течением времени информативных параметров ДВС АТ при функционировании в различных условиях.

3. Алгоритм определения оптимальной периодичности проведения ТО ДВС АТ.

4. Методика проведения ТО ДВС АТ в различных условиях эксплуатации.

5. Научно-технические предложения по применению разработанного методического инструментария при организации ТО АТ при эксплуатации в различных условиях [15,16].

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта, а именно п. 12 «Закономерности изменения технического состояния автомобилей, их агрегатов и систем, технологического оборудования предприятий, совершенствование на их основе систем технического обслуживания и ремонта, определение нормативов технической эксплуатации», п. 19 «Требования и особенности организации технического обслуживания и ремонта автомобилей в особых производственных природно-климатических условиях».

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность научных положений, основных выводов и результатов работы обеспечиваются применением современных методов исследования с использованием теории малой выборки при статистической обработке данных, а также за счет анализа состояния исследований в данной области, согласованности теоретических выводов с экспериментальными данными, апробацией основных теоретических положений диссертации в печатных трудах и докладах на научных конференциях различного уровня.

Результаты исследования апробировались на IX Международной научно-технической конференции «Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ)» (Курск, 2017); 8-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные инновации в науке и технике»; X Международной научно-технической кон-

ференции «САМИТ» (Курск, 2018), XI Всероссийской межведомственной научной конференции (Орёл, 2019), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 971, 052087 (2020) (ICMTMTE 2020), VI и VII Международных научно-практических конференциях «Информационные технологии и инновации на транспорте» (Орёл, 2020, 2021).

Публикации. Результаты диссертации отражены в 14 работах, опубликованных в периодических научно-технических изданиях, из них 4 научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 статьи в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования (Scopus, Web Of Sciens). Получены 2 патента на полезную модель, а также 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Реализация и внедрение результатов работы. Полученные научные результаты реализованы и внедрены в автомобильных парках в в/ч 35657, в/ч 69793, в/ч 77071, в/ч 16662, в/ч 28677 и используются для организации ТО и ремонта ДВС АТ автомобильного парка данных организаций, что подтверждается соответствующими актами о внедрении.

Результаты проведенных исследований применяются в учебном процессе на кафедре СиРМ в ОГУ имени И.С. Тургенева.

Личный вклад автора. Автором лично выполнены все этапы исследования: постановка задачи; создание теоретических модельных описаний, методического и алгоритмического обеспечения; формулировка выводов.

Структура и объем работы. Структура и последовательность изложения результатов диссертационной работы определены целью и задачами исследования. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений, содержит 155 страницы текста, 20 таблиц, 22 рисунка. Библиографический список включает 110 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проведено обоснование актуальности, теоретической и практической значимости темы исследования, показано состояние исследуемого вопроса, определены объект, предмет и цель исследования, сформулирована научная задача исследования, представлены реализация, апробации и публикации результатов.

В первой главе произведен анализ информативных параметров ДВС АТ, основных тенденций развития автомобильного транспорта и особенностей эксплуатации АТ, а также показана взаимосвязь изменения ИП ДВС АТ и различных условий эксплуатации, характеризующихся, как правило, сочетанием одновременно нескольких неблагоприятных факторов – природно-климатических, транспортных и дорожных, для каждого из которых, в свою очередь, соответствующими нормативами предусматривается возможность корректировки объема и периодичности операций ТО.

В работе показано, что из общей совокупности контролируемых при проведении ТО параметров ДВС АТ может быть выделен ряд наиболее информативных (определяющих) параметров, которые вплотную связаны с ускоренным выходом из строя ДВС в различных условиях эксплуатации. Выход одного из таких параметров за допустимые (заданные) пределы приводит к отказу АТ в целом, и, наоборот, поддержание значений указанных параметров в пределах нормы позволит обеспечить работоспособность в течение всего заданного интервала времени (срока службы) [4]. Анализ имеющихся по данной теме работ позволяет сделать вывод о том, что среди многих агрегатов АТ при эксплуатации в различных условиях можно выделить наиболее важный – ДВС, от которого преимущественно будет зависеть работоспособность АТ в данных условиях и который применительно к АТ будет во многом определять вероятность выполнения этим

транспортом задания (ее успешного применения по назначению). В соответствии с ГОСТ 27.310–95 под критичными агрегатами АТ (для тех или иных условий эксплуатации) будем понимать те агрегаты, отказ которых в данных условиях может быть критическим, т. е. иметь недопустимую тяжесть последствий, и требует принятия специальных мер по снижению вероятности его возникновения. При этом применительно к АТ ответственного назначения, для которого актуальность выполнения поставленной задачи стоит выше прочих требований, в зависимости от тяжести последствий отказов могут быть выделены три основные категории агрегатов АТ по критичности. К первой группе относятся критичные агрегаты, отказ которых может повлечь за собой срыв выполнения поставленной задачи, ко второй группе – менее критичные агрегаты, при отказе которых может происходить задержка выполнения задачи или снижение эффективности АТ, не представляющие опасности для здоровья людей, самой АТ или окружающей среды. Третья группа – агрегаты, отказ которых не влечет задержку выполнения задачи и не представляет опасности, но может повлечь за собой снижение качества функционирования АТ. В работе были произведены анализ, классификация и выбор перечня критичных агрегатов АТ, подлежащих дальнейшему исследованию (рисунок 1) [4]. Сделан вывод о необходимости разработки научно обоснованных гибких стратегий проведения ТО ДВС АТ, основанных на прогнозировании момента отказа АТ путем экстраполяции процесса изменения ИП ДВС АТ на интервале использования по назначению. При этом на практике в ряде случаев (например, при наличии достаточно большого количества АТ) часто оказывается возможным и целесообразным сгруппировать однотипный АТ со схожими условиями эксплуатации и перейти к групповому (вероятностному) прогнозированию.

Как показал проведенный анализ, для каждого конкретного условия эксплуатации необходимо изучение закономерностей изменения во времени значений контролируемых параметров ДВС и их дальнейший анализ с целью недопущения выхода этих значений за установленные пределы (отказа). Эта задача может быть успешно решена путем организации гибкой стратегии ТО ДВС АТ с оптимальной по заданным критериям периодичностью, основанной на использовании методов вероятностного прогнозирования.

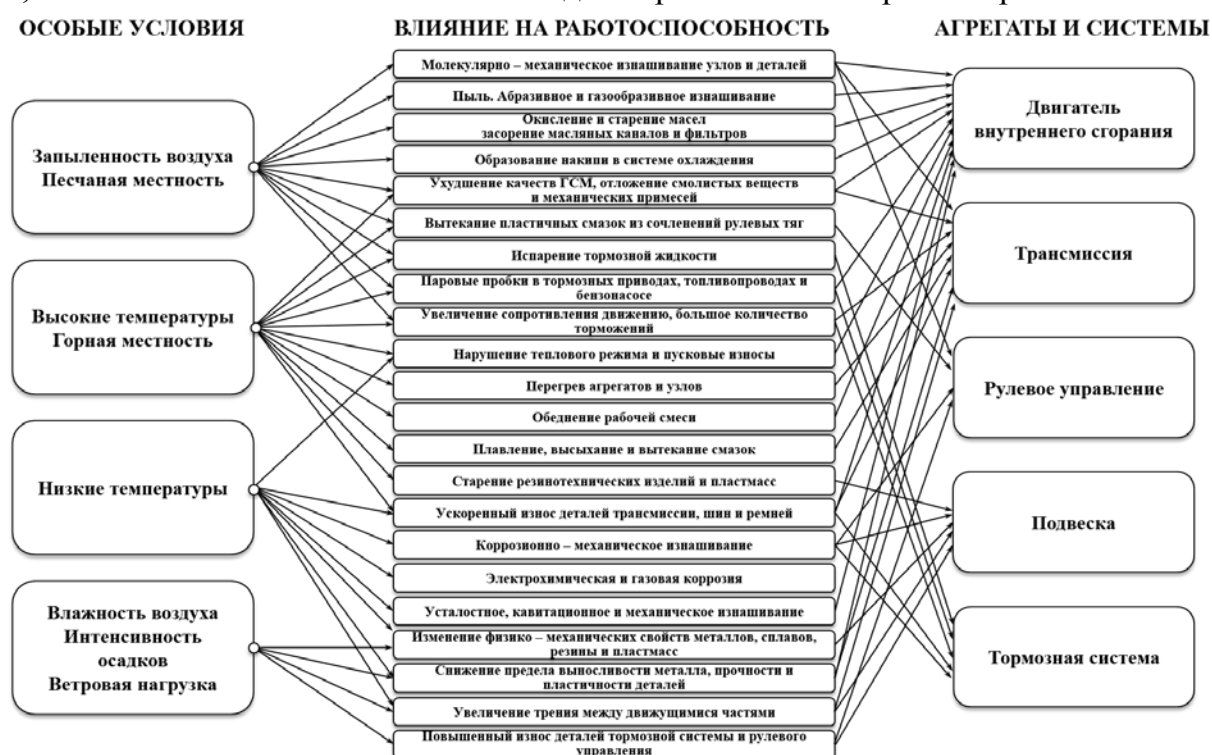


Рисунок 1 – Основные факторы, влияющие на надежность критичных агрегатов АТ при эксплуатации

Во второй главе произведены разработка и обоснование вероятностных моделей изменения ИП ДВС АТ при функционировании в различных условиях. Обоснован вывод о том, что изменение контролируемых параметров ДВС следует рассматривать как случайный процесс, который не может быть задан строго детерминированной функциональной зависимостью, а исследование присущих ему закономерностей должно быть основано на использовании вероятностно-статистических методов. Показано, что ограничения, присущие большинству из известных теоретических моделей, пригодных для описания различного рода случайных процессов (СП), вследствие ограниченности исходной информации на практике, как правило, не позволяют использовать их для описания СП изменения параметров ДВС. При этом принципиально новые возможности вероятностного описания СП для изучения закономерностей изменения параметров АТ во времени с целью решения задач прогнозирования появляются при использовании вероятностных моделей СП, представляющих собой совокупность детерминированной функции, отражающей закономерность изменения параметров, и случайных коэффициентов, конкретизирующих процесс. В работе показано, что для информативных параметров ДВС АТ на практике, как правило, характерно монотонное изменение во времени с незначительными флуктуациями, при этом случайность в основном проявляется в характере протекания именно монотонных составляющих, в результате чего становится возможным успешное использование вероятностных моделей для решения задач прогнозирования экстраполяцией. В качестве базовых функций для вероятностных моделей применяются различные детерминированные функции, каждая из которых при различных условиях ее эксплуатации описывает закономерность изменения параметров ДВС АТ, и имеет случайные коэффициенты, распределенные по одному из известных законов. Задача прогнозирования при этом состоит в нахождении плотности распределения функции по заданному распределению ее аргументов, т. е. определение плотности распределения времени достижения тем или иным параметром своего предельно допустимого (нормированного) значения (табл. 1) [3].

Таблица 1 – Прогнозные КД-модели изменения ИП ДВС и результаты расчета плотности распределения времени (ПРВ) до выхода их значений за допустимые пределы

Вид модели временного дрейфа ИП АТ	Их характеристика (условия применимости на практике)	Случайные коэффициенты модели	$\omega(\tau_{пр})$ – ПРВ до выхода ИП за допустимые пределы в общем виде
Линейная. $I(t) = I_0 - a_1 t$	Описание процесса простого накопления необратимых изменений в узлах и деталях АТ например, при их постепенном износе, электрохимической или газовой коррозии и т.п.	a_1	$\omega(\tau_{пр}) = \frac{\Delta I}{\tau_{пр}} \cdot \omega\left(\frac{\Delta I}{\tau_{пр}}\right)$
		$\Delta I = I_0 - I_{пр}$	$\omega(\tau_{пр}) = J_{\Delta I} \omega(\psi_{\Delta I}) = a_1 \omega(a_1 \tau_{пр})$
		a_1 и ΔI	$\omega(\tau_{пр}) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega_2(\Delta I) \omega\left(\frac{\Delta I}{\tau_{пр}}\right) \frac{\Delta I}{\tau_{пр}} d(\Delta I)$
Логарифмическая. $I(t) = I_0 - I_0 \cdot \ln\left(1 + \frac{a_1 t}{I_0}\right)$	Описание процесса старения материалов, у которых скорость старения убывает обратно пропорционально накопившимся в этих материалах изменениям - например, при изменении свойств масел и топлива при различных условиях эксплуатации АТ	a_1	$\omega(\tau_{пр}) = \omega(a_1) \frac{\Delta I}{\tau_{пр}^2} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta I}{I_0}\right)\right)$
		a_1 и ΔI	$\omega(\tau_{пр}) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega_2(a_1) \omega\left(\frac{\Delta I}{\tau_{пр}}\right) \frac{\Delta I}{\tau_{пр}} \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta I}{I_0}\right)\right) d\Delta I$
Экспоненциальная. $I(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{a_1 t}{I_0}}$	Описание процессов старения материалов узлов и деталей АТ, являющихся результатом перехода материала из неравновесного состояния, возникшего при изготовлении, в равновесное, под влиянием различных дестабилизирующих факторов	a_1	$\omega(\tau_{пр}) = \omega(a_1) \cdot \frac{\Delta I}{\tau_{пр}^2} \cdot \ln\left(\frac{I_0}{I_{пр}}\right)$
		a_1 и ΔI	$\omega(\tau_{пр}) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega_2(a_1) \frac{\Delta I}{\tau_{пр}^2} \ln\left(\frac{I_0}{I_{пр}}\right) \omega(I_0) d\Delta I$

Примечание: I_0 и $I_{пр}$ – начальное и предельно допустимое значения определяющего параметра критичных агрегатов АТ, $\Delta I = I_0 - I_{пр}$ – разница между начальным и пре-

дельным значениями параметров, a_1 – коэффициенты моделей, характеризующие процесс изменения значений параметров.

В работе представлена последовательность решения задачи определения ПРВ достижения параметрами ДВС АТ своих предельно допустимых значений при использовании различных вероятностных моделей изменения значения ИП. Найденная плотность распределения будет являться исчерпывающей (универсальной) характеристикой непрерывной случайной величины – времени безотказной работы ДВС АТ, полностью характеризующей ее с вероятностной точки зрения, и позволяет рассчитать вероятность безотказной работы в любой текущий момент времени или, напротив, найти момент времени после начала эксплуатации, в который значение вероятности безотказной работы будет удовлетворять заданным требованиям:

$$P_{\text{бр}}(t) = P(\Pi \geq \Pi_{\text{пред}} \forall t \leq t_{\text{зад}}) = 1 - \int_0^{t_{\text{зад}}} \omega(t) dt, \quad (1)$$

где $\Pi_{\text{пред}}$ – предельно допустимые (нормированные) значения ИП АТ,

$\omega(t)$ – плотность распределения времени достижения контролируруемыми параметрами АТ своих предельно допустимых значений.

Разработанные модели изменения информативных параметров ДВС и рассчитанные на их основе время достижения ими своих предельных значений носят универсальный характер и могут быть использованы для различных критичных агрегатов АТ, определяющих ее надежность в данных (конкретных) условиях. При этом для каждого из параметров применительно к тем или иным условиям эксплуатации АТ может быть найдена оптимальная периодичность проведения ТО, позволяющая повысить надежность АТ в различных условиях эксплуатации.

В третьей главе представлены алгоритм оптимальной периодичности проведения ТО ДВС АТ, а также методика проведения ТО ДВС АТ в различных условиях эксплуатации. При этом в работе внимание уделялось, в первую очередь, показателям безотказности АТ. Это связано с тем, что для АТ (как системы длительной эксплуатации) особенно важным оказывается свойство сохранять работоспособное состояние в течение определенной наработки [1,2]. Кроме того, прочие составляющие надежности АТ (ее ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость) определяются по большей части уже при изготовлении (производстве) АТ, и поэтому влияние на них различных методов контроля и проведения ТО в ходе эксплуатации оказывается не столь существенным.

В связи с тем, что для АТ (ответственного назначения) готовность к использованию в любой момент времени является одним из определяющих свойств, для количественной оценки эффективности функционирования АТ в работе введен удельный показатель готовности АТ [2]

$$K_{\text{Г}}^{\text{уд}}(\tau) = \frac{K_{\text{ПГ}}(\tau)}{C(\tau)}, \quad (2)$$

где τ – периодичность ТО и контроля параметров;

$K_{\text{ПГ}}(\tau)$ – показатель готовности АТ, характеризующий ее готовность к использованию по предназначению в произвольный момент времени и зависящий от значений периодичности ТО и контроля τ :

$$K_{\text{ПГ}}(\tau) = \frac{\overline{t_{\text{бр}}}}{\tau + \tau_{\text{к}} + P_{\text{отк}}(\tau) \cdot \tau_{\text{в}}}, \quad (3)$$

где $\overline{t_{\text{бр}}} = \int_0^{\tau} P(t) dt$ – среднее время безотказной работы АТ на интервале τ ;

$\overline{\tau_{\text{к}}}$ и $\overline{\tau_{\text{в}}}$ – средняя длительность контроля и восстановления работоспособности АТ соответственно, $P_{\text{отк}}(\tau)$ – вероятность отказа АТ на интервале τ ;

$C(\tau)$ – средние относительные непроизводительные затраты на эксплуатацию АТ:

$$C(\tau) = \frac{\overline{C_{\text{к}}} \cdot \overline{\tau_{\text{к}}} + P_{\text{отк}}(\tau) \cdot (\overline{C_{\text{отк}}} t_{\text{отк}} + \overline{C_{\text{в}}} \cdot \overline{\tau_{\text{в}}})}{P_0(\tau) \cdot \overline{C_{\text{ф}}} \cdot \overline{t_{\text{бр}}} + P_{\text{отк}}(\tau) \cdot (\overline{C_{\text{отк}}} \cdot t_{\text{отк}} + \overline{C_{\text{в}}} \cdot \overline{\tau_{\text{в}}}) + \overline{C_{\text{к}}} \tau_{\text{к}}}, \quad (4)$$

где $\overline{C_{\text{к}}}$, $\overline{C_{\text{отк}}}$, $\overline{C_{\text{в}}}$ – средние затраты на эксплуатацию АТ в режиме ТО, в режиме отказа и в режиме восстановления работоспособности соответственно; $\overline{C_{\text{ф}}}$ – средние затраты на эксплуатацию АТ при ее безотказном функционировании; $\overline{t_{\text{отк}}} = \tau - \overline{t_{\text{бр}}}$ – среднее время отказа АТ на интервале τ , $\overline{\tau_{\text{к}}}$ и $\overline{\tau_{\text{в}}}$ – средняя длительность контроля и восстановления работоспособности АТ соответственно.

Очевидно, что обобщенный показатель вида (1) зависит от периода контроля и проведения ТО τ , при этом при практической эксплуатации АТ в различных условиях зачастую бывает необходимо определить оптимальную периодичность $\tau_{\text{опт}}$, при которой обеспечивается заранее заданное значение показателя готовности АТ при минимально возможных при этом затратах на эксплуатацию.

Исходные данные для алгоритма включают:

- предельно допустимые значения контролируемых параметров ДВС, приведенные в технической документации;
- имеющиеся (предварительно полученные) статистические данные о предшествующих значениях контролируемых параметров.

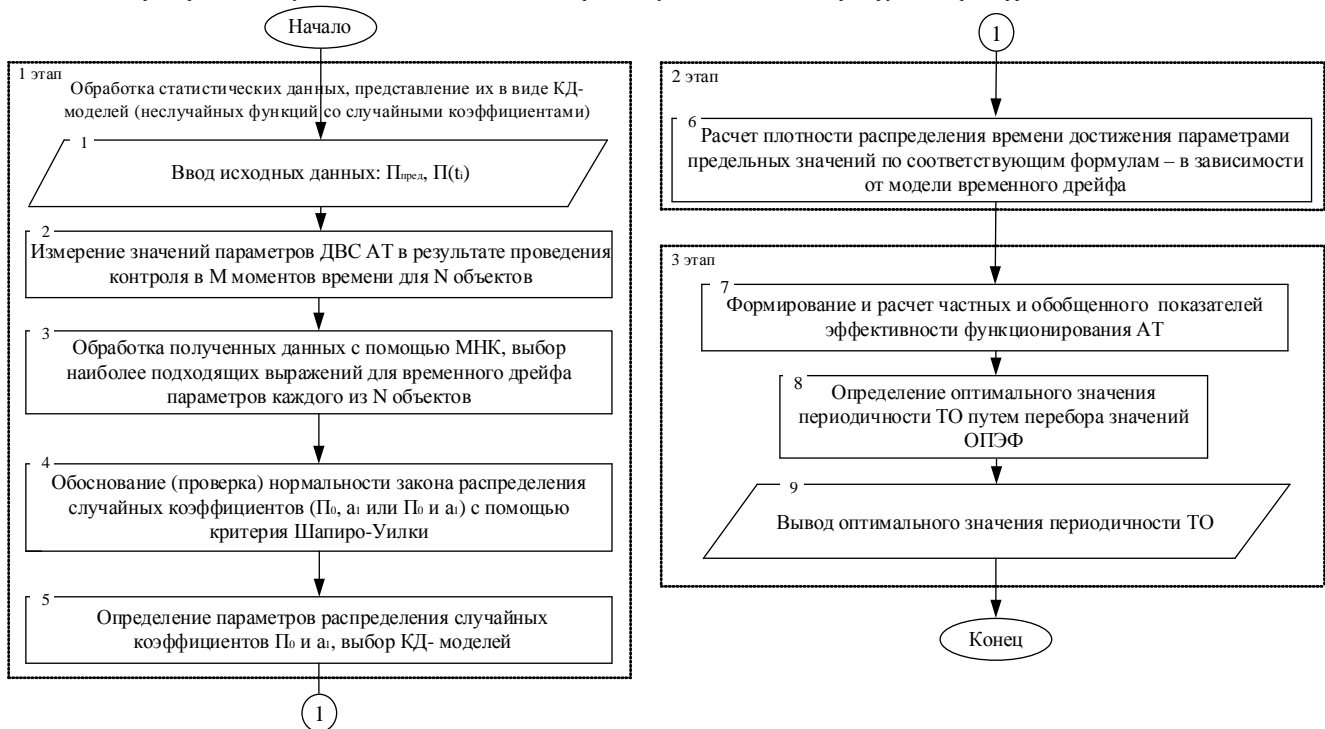


Рисунок 2 – Алгоритм определения оптимальной периодичности проведения ТО ДВС АТ

Представленный в работе алгоритм определения оптимальной периодичности технического обслуживания ДВС (рисунок 2) позволяет определять значения оптимальной

периодичности контроля значений ИП ДВС АТ применительно к условиям ее эксплуатации. В свою очередь, найденные оптимальные значения периодичности технического обслуживания ДВС могут быть использованы при применении методики проведения ТО ДВС АТ в различных условиях эксплуатации, позволяющего организовать гибкую стратегию ТО ДВС АТ применительно к тем или иным условиям эксплуатации [1].

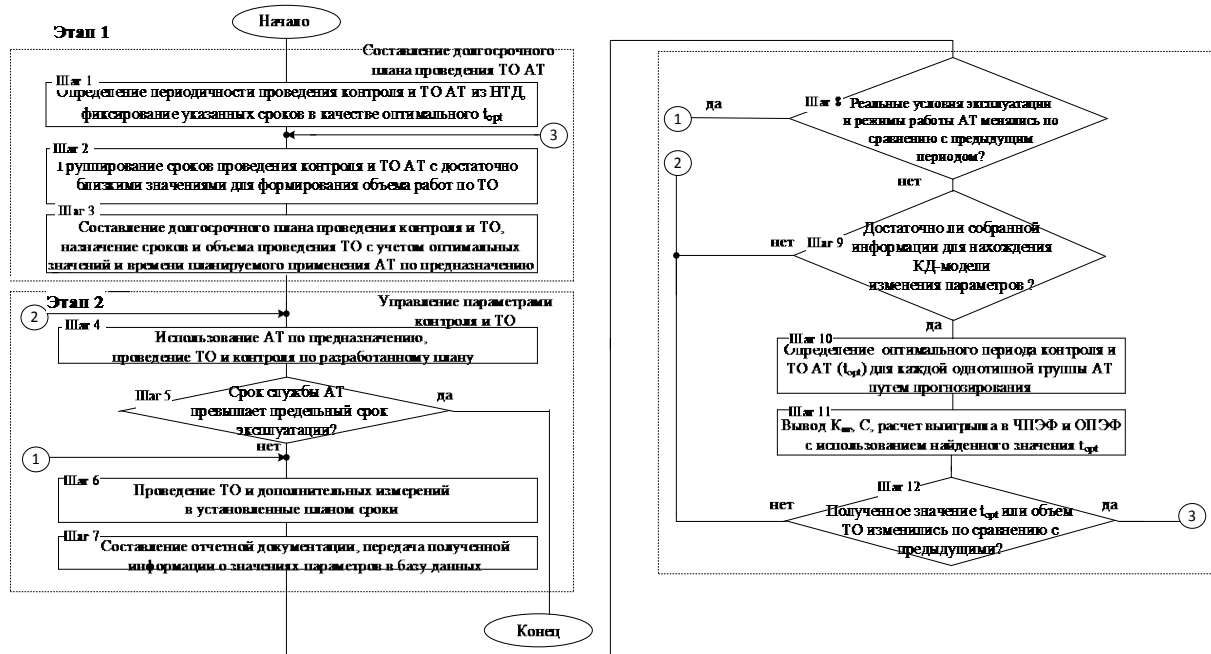


Рисунок 3 – Методика проведения ТО ДВС АТ в различных условиях эксплуатации

Представленная в работе методика проведения ТО ДВС АТ позволяет организовать гибкую стратегию ТО (рисунок 3), которая является одним из возможных путей повышения надежности ДВС при снижении затрат на эксплуатацию в различных условиях [1]. Исходными данными для реализации данной методики являются измеренные значения ИП для ДВС АТ, полученные в ходе предшествующих измерений (например, в ходе проведения регламентных работ и предшествующих сеансов ТО), представленный на рисунок 2 алгоритм, а также вероятностные модели, сведенные в таблицу 1. Для реализации алгоритма используются штатные сотрудники, выполняющие свои обязанности по проведению ТО агрегатов АТ при помощи штатных (предусмотренных инструкциями) контрольно-измерительных приборов и оборудования [1]. На первом этапе методики (шаги 1–3) составляется долгосрочный (предварительный) план проведения ТО. На втором этапе (шаги с 4 по 12) осуществляется управление параметрами ТО (т. е. объемом и периодичностью выполняемых операций).

Таким образом, предлагаемая методика позволяет организовать гибкую стратегию ТО ДВС АТ, при которой достигается заранее заданное значение $K_{пл}$ АТ при снижении затрат на ее эксплуатацию. При этом, в отличие от существующих подходов к обеспечению надежности АТ, она учитывает индивидуальные особенности изменения значения параметров конкретных типов АТ во времени с учетом различных условий эксплуатации и в целом обеспечивает решение поставленной научной задачи.

В четвертой главе представлен анализ результатов экспериментальных исследований по повышению эксплуатационной надежности ДВС, получены зависимости удельного коэффициента готовности от периодичности ТО при эксплуатации, а также результаты апробации полученных результатов на практике.

Для апробации разработанного алгоритма и методики в 2016–2019 гг. на базе автомобильных парков в Гатчине, Рыбинске, Хабаровске и Уссурийске проводился эксперимент по исследованию закономерностей изменения значений ИП ДВС. Целями эксперимента являлись периодический контроль значений данных параметров в конкретных условиях эксплуатации, исследование и определение закономерностей их изменения, математическое моделирование и прогнозирование времени безотказной работы [7]. В ходе эксперимента после выбора соответствующей прогнозной модели, закона и параметров распределения ее случайных коэффициентов производилось определение ПРВ до выхода ИП за допустимые пределы, после чего на основе выбранных показателей вида (1) – (3) определялась оптимальная периодичность ТО ДВС. С учетом найденных оптимальных значений периодичности ТО был разработан вариант организации гибкой стратегии ТО ДВС АТ типа КамАЗ, ЗИЛ.

Результаты расчетов зависимостей ПРВ, $R_{бр}$, и ОПЭФ от периодичности проведения ТО для ДВС АТ типа КамАЗ-43114, ЗИЛ-131 по данным эксперимента приведены на рисунках 4.1–4.4.

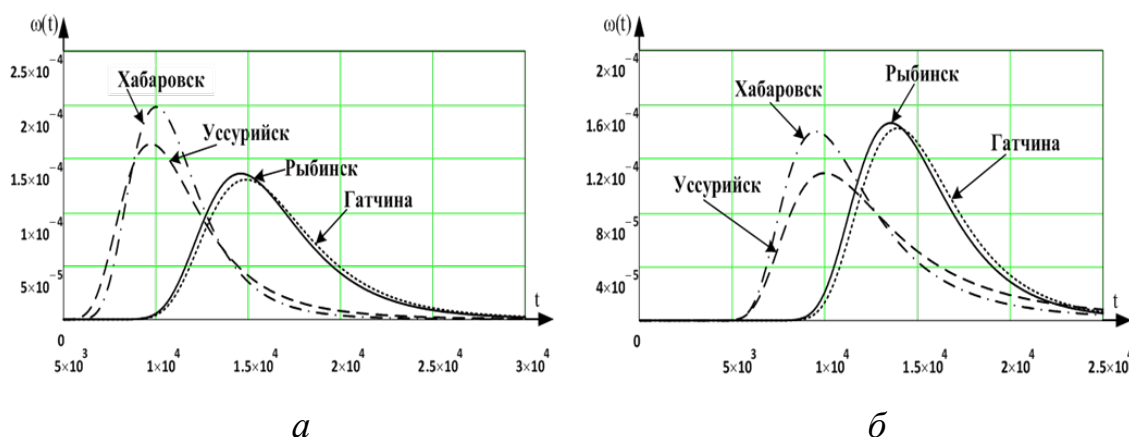


Рисунок 4.1 – Результаты расчета зависимостей ПРВ до выхода значений величины компрессии ДВС при эксплуатации (КамАЗ-43114 (а), ЗИЛ-131 (б))

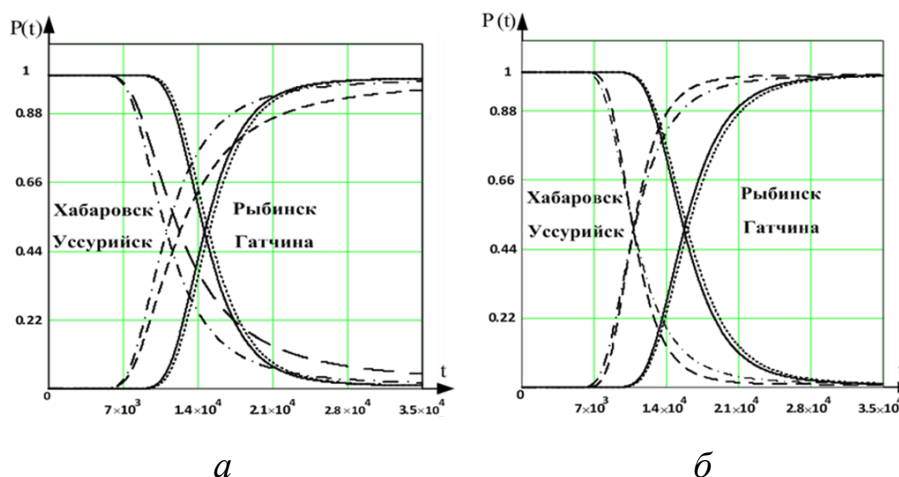


Рисунок 4.2 – Результаты расчета зависимостей $R_{бр}$ при эксплуатации (КамАЗ-43114 (а), ЗИЛ-131 (б))

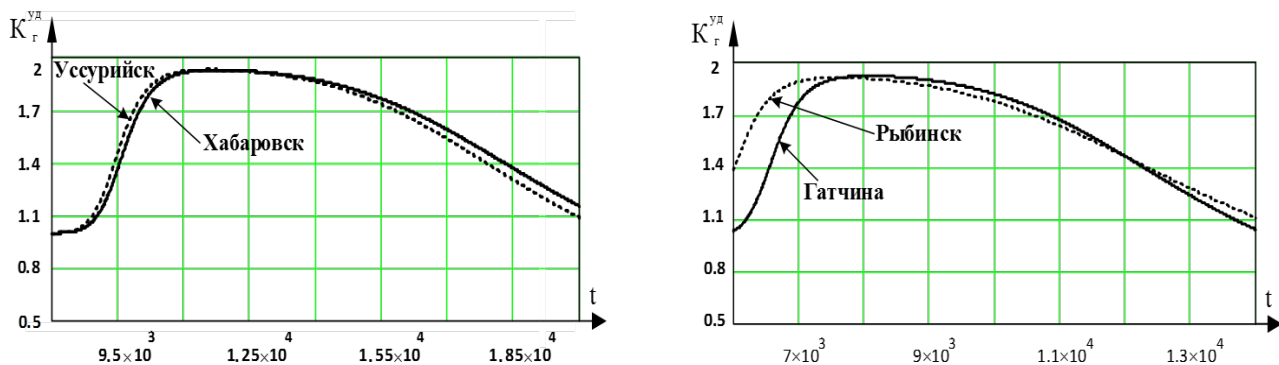


Рисунок 4.3 – Результаты расчета зависимости удельного коэффициента готовности ДВС АТ типа КамАЗ-43114 при эксплуатации

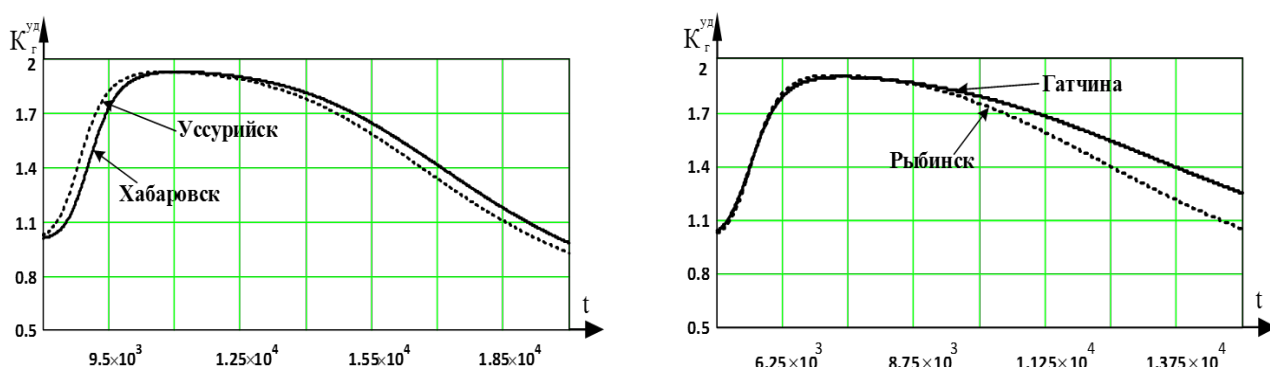


Рисунок 4.4 – Результаты расчета зависимости удельного коэффициента готовности ДВС АТ типа ЗИЛ-131 при эксплуатации

Эффект, полученный от применения разработанной гибкой стратегии по сравнению с существующей плановой (жесткой) системой ТО на практике, представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты применения разработанных алгоритмов для автомобилей КамАЗ-43114, ЗИЛ-131 в различных условиях их эксплуатации

Агрегат (параметр) и тип АТ	Плановый период ТО	Регион (условия эксплуатации)	Оптимальный период ТО, $\tau_{то}$ ч	Предложение по оптимизации периодичности ТО (организации гибкой стратегии ТО и контроля)	Значения $K_c^{уд} (T_{то})$	Значения $K_c^{уд} (\tau_{то})$	$\Delta K_c^{уд}, \% ^*$
Величина компрессии ДВС, КамАЗ-43114	1 год (8760 ч)	Гатчина	11 800	1 год 4 месяца (реже на 34 %)	1,870	1,928	3%
		Рыбинск	12 000	1 год 5 месяцев (реже на 36 %)	1,860	1,927	3,60%
		Уссурийск	8 000	11 месяцев (чаще на 8 %)	1,790	1,922	7,40%
		Хабаровск	7 700	10 месяцев (чаще на 12 %)	1,755	1,912	9%
Величина компрессии ДВС, ЗИЛ-131	1 год (8760 ч)	Гатчина	11 000	1 год 3 месяца (реже на 25 %)	1,860	1,927	3,60%
		Рыбинск	11 300	1 год 4 месяца (реже на 28 %)	1,850	1,298	4,20%
		Уссурийск	7 600	10 месяцев (чаще на 13 %)	1,755	1,895	8%
		Хабаровск	7 400	9-10 месяцев (чаще на 15 %)	1,735	1,903	9,60%

* $\Delta K_c^{уд}$ - изменение удельного показателя готовности (при разработанной гибкой стратегии ТО по сравнению с плановой)

Из таблицы видно, что при применении разработанного алгоритма достигается повышение $K_g^{уд}$ в среднем на 6,5 % (по данным эксперимента).

В пятой главе представлены научно-технические предложения для организации гибкой стратегии ТО ДВС АТ, а также экономическая эффективность результатов исследований.

Научно-технические предложения включают в себя как аппаратную (устройство), так и программную (разработанное программное обеспечение, установленное на специализированных рабочих местах – ПЭВМ) части и позволяют определить оптимальную по введенным критериям периодичность проведения ТО ДВС АТ в зависимости от условий эксплуатации, а также реализовать гибкую стратегию ТО на практике (в практических подразделениях).

Недостатком предлагаемого в работе подхода является необходимость предварительного сбора статистических данных о значениях ИП в различные моменты времени, т. е. выигрыш в надежности достигается за счет некоторого снижения оперативности (увеличения числа операций) при проведении ТО и контроля. Для устранения указанного недостатка были разработаны устройства, позволяющие повысить оперативность и точность контроля значений параметров. Так, для определения наработки ДВС было разработано устройство для повышения точности определения остаточного ресурса ДВС АТ [15].

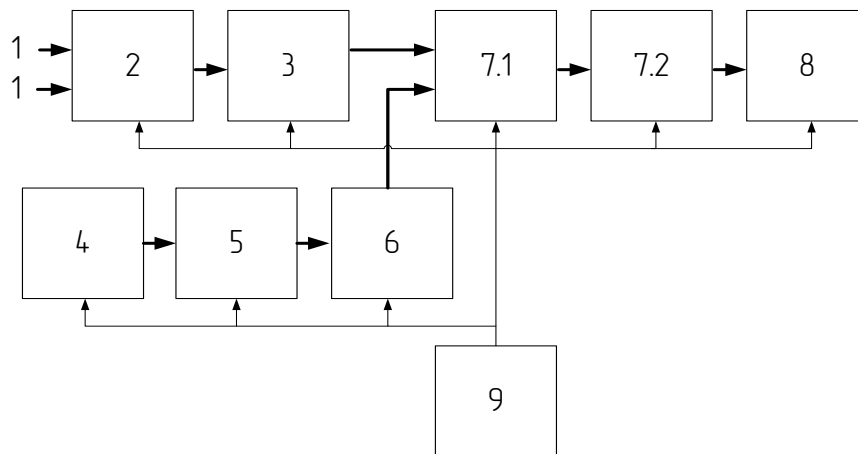


Рисунок 5 – Устройство для повышения точности определения остаточного ресурса двигателя внутреннего сгорания:

1 – сигналы с контактов тахометра; 2 – аппаратный удвоитель импульсов; 3 – нереверсивный суммирующий счетчик импульсов с энергонезависимой памятью; 4 – делитель напряжения с термистором; 5 – АЦП; 6 – АЛУ; 7.1 – первый умножитель; 7.2 – второй умножитель; 8 – цифровой жидкокристаллический индикатор; 9 – схема контроля питания

Применение разработанного устройства позволяет повысить точность определения периодичности ТО узлов и деталей ДВС АТ на 10–12 % за счет учета особенностей их эксплуатации в конкретных условиях.

Обеспечение требуемых значений показателя готовности и в целом повышение надежности ДВС АТ могут достигаться также за счет уменьшения времени восстановления путем своевременной замены отказавших узлов и деталей. С этой целью было разработано устройство для определения количества резервных элементов системы, позволяющее рассчитать оптимальное число элементов (узлов и деталей) различного типа, которые должны быть на станциях ТО АТ [16].

Для повышения оперативности расчета оптимальных значений периодичности ТО ДВС, а также показателей их надежности были разработаны две специализированные программы для ЭВМ, реализующие описанный ранее алгоритм (рисунок 2) [17,18].

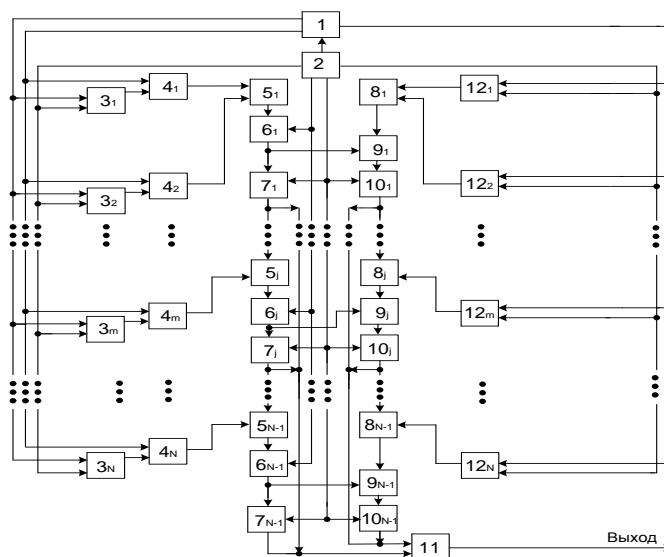


Рисунок 6 – Устройство для определения количества резервных элементов системы:

1 – входная наборная панель; 2 – управляющее устройство; $3_1, 3_2, \dots, 3_N$ – блоки вычисления вероятности отказа; $4_1, 4_2, \dots, 4_N$ – блоки учета накладных расходов; $5_1, 5_2, \dots, 5_{N-1}$ – первая группа сумматоров; $6_1, 6_2, \dots, 6_{N-1}$ – компараторы; $7_1, 7_2, \dots, 7_{N-1}$ – первая группа оперативных запоминающих устройств; $8_1, 8_2, \dots, 8_{N-1}$ – вторая группа сумматоров; $9_1, 9_2, \dots, 9_{N-1}$ – элементы «И»; $10_1, 10_2, \dots, 10_{N-1}$ – вторая группа оперативных запоминающих устройств; 11 – блок отображения; $12_1, 12_2, \dots, 12_N$ – блоки вычисления стоимости

Разработка гибких стратегий проведения ТО применительно к ДВС и их использование на практике позволят своевременно проводить ТО, т. е. обеспечивать постоянное нахождение значений ИП в пределах нормы, предотвращая тем самым как выход из строя отдельных агрегатов АТ, так и отказ АТ в целом. При этом описанный выше подход к определению оптимальной периодичности ТО может быть реализован совместно со статистическим подходом – например, использоваться для корректирования ТО по регламенту. При этом ТО и контроль АТ, проводимые по гибкой стратегии, в отличие от обслуживания по регламенту, позволят учесть такие факторы, как техническое состояние и различные условия эксплуатации АТ для каждого конкретного случая.

Экономическая эффективность от оптимального проведения ТО при использовании гибкой стратегии с учетом условий эксплуатации будет определяться снижением расходов на проведение ТО двигателей (таблица 3).

Таблица 3 – Анализ ориентировочной стоимости проведения ТО-2 за гарантийный срок эксплуатации двигателей КамАЗ при использовании гибкой стратегии ТО

Мероприятия при ТО-2	300 000 км пробега				
	ТО-2 при 16 000 км согласно РЭ	ТО-2 21 500 км Гатчина	ТО-2 21 760 км Рыбинск	ТО-2 14 700 км Уссурийск	ТО-2 14 000 км Хабаровск
Замена масла	18 операций 198 т.р.	14 операций 154 т.р.	13 операций 143 т.р.	20 операций 220 т.р.	22 операций 242 т.р.
Регулировка ТНВД	4 операции 52 т.р.	3 операции 39 т.р.	3 операции 39 т.р.	5 операций 65 т.р.	5 операций 65 т.р.
ИТОГО	250 т.р.	193 т.р.	182 т.р.	285 т.р.*	307 т.р.*
*В среднем капитальный ремонт двигателя стоит от 100 т.р. до 130 т.р.					

При указанных значениях периодичности и эксплуатации АТ в усредненных условиях (в Гатчине и Рыбинске) и среднегодового пробега в 50 тыс. км достигается существенный экономический эффект (около 9 500 рублей в год на каждую единицу автомобильного парка). При эксплуатации АТ в более сложных условиях (в Уссурийске и Хабаровске) происходит увеличение затрат на проведение ТО, но при этом исключается возможность преждевременного отказа ДВС и расходов на капитальный ремонт. Кроме того, дополнительный экономический эффект при переходе на гибкую стратегию ТО может быть получен от снижения простоев автомобиля из-за отсутствия запасных двигателей, повышения производительности АТ, понижения затрат на транспортировку двигателей на ремонтные заводы, уменьшения отказов АТ ввиду неисправности при эксплуатации в различных условиях. Таким образом, поддержание удовлетворительного технического состояния ДВС при использовании гибкой системы ТО по результатам диагностирования с обоснованной в работе периодичностью позволит продлить ресурс и сократить эксплуатационные затраты, получив при этом существенный экономический эффект.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная задача по разработке алгоритмов, позволяющих организовать гибкую стратегию ТО ДВС АТ при эксплуатации в различных условиях.

В работе были получены следующие основные результаты:

1. Выполненный анализ статистики распределения отказов АТ в зависимости от условий эксплуатации показал, что совокупность представленных факторов оказывает существенное влияние на надежность одного из важнейших агрегатов – ДВС. Произведен проблемно-классификационный анализ функциональных параметров ДВС, выбор пригодных для дальнейшего прогнозирования надежности информативных параметров, оказывающих наибольшее влияние на работоспособность ДВС АТ в различных условиях эксплуатации.

2. Обоснован выбор обобщенного показателя надежности – удельного показателя готовности, зависящего от периодичности проведения ТО ДВС АТ при эксплуатации, а также определена оптимальная периодичность ТО, позволяющая повысить готовность АТ.

3. Разработаны вероятностные модели постепенного изменения контролируемых параметров ДВС АТ, учитывающие различные условия эксплуатации и позволяющие определить время достижения параметрами своих предельных значений.

4. На базе вероятностных моделей и введенных показателей эффективности разработан алгоритм определения оптимальной периодичности ТО ДВС АТ, позволяющий либо минимизировать удельные непроизводительные затраты на эксплуатацию ДВС при выполнении требований по надежности (прямая задача), либо обеспечить максимально возможное значение показателя готовности ДВС при заданных ограничениях на затраты (обратная задача).

5. В результате использования разработанной методики проведения ТО ДВС АТ в различных условиях эксплуатации, при организации гибкой стратегии ТО по данным эксперимента в Гатчине, Рыбинске, Уссурийске и Хабаровске на примере автомобилей КамАЗ-43114 и ЗИЛ-131 достигается повышение удельного показателя готовности в среднем на 6,5 %.

6. Разработаны научно-технические предложения по применению разработанного методического инструментария при организации ТО, позволяющие повысить точность определения оптимальной периодичности ТО ДВС АТ на 10–12 % с учетом особенностей эксплуатации в конкретных условиях.

В качестве возможных перспективных направлений дальнейших исследований можно отметить разработку более сложных (нелинейных) моделей, описывающих закономерности постепенного изменения значений контролируемых параметров ДВС АТ с течением времени, сопоставление тех или иных аналитических моделей отклонения с конкретными условиями эксплуатации АТ, выявление и описание соответствующих закономерностей, а также расширение перечня контролируемых агрегатов АТ разных типов для различных условий эксплуатации.

Публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов для опубликования основных научных результатов диссертаций (ВАК)

1. **Савин, Л. О.** Разработка алгоритмов управления параметрами технического обслуживания автомобильной техники при ее эксплуатации в особых условиях / Л. О. Савин // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – № 11. – С. 199–208.

2. **Савин, Л. О.** Оптимизация параметров контроля и ТО критичных агрегатов АТ при ее эксплуатации в особых условиях / Л. О. Савин, М. В. Королёв // Вестник Московского автомобильно-дорожного технического университета (МАДИ). – 2019. – № 1 (56). – С. 24–35.

3. **Савин, Л. О.** Научно-практические предложения по повышению надежности агрегатов (систем) АТ путем резервирования входящих в их состав элементов / Л. О. Савин, М. В. Королёв, Е. И. Ларкин // Мир транспорта и технологических машин. – 2019. – № 1 (64). – С. 19–29.

4. **Савин, Л. О.** Повышение точности определения периодичности технического обслуживания двигателей внутреннего сгорания на автомобильной технике при ее эксплуатации в особых условиях / Л. О. Савин // Мир транспорта и технологических машин. – 2021. – № 2 (73). – С. 23–32.

Публикации в изданиях, входящих в базы Scopus и Web of Science

5. **Savin, L. O.** On the possibility of individual forecasting of reliability factors of mechanical transport units / L.O. Savin, A.N. Novikov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 971, 052087 (2020) (ICMTMTE 2020).

6. **Savin, L. O.** Improvement of maintenance and repair system of internal combustion engines of automotive equipment / L. Savin, A. Stetsenko, V. Panyushkin // MATEC Web of Conferences 341, 00062 (2021) (ITMTS 2021).

Публикации в других изданиях

7. **Савин, Л. О.** Разработка прогнозных моделей временного дрейфа определяющих параметров автомобильной техники при ее эксплуатации в особых условиях / Л. О. Савин, М. В. Королёв, М. В. Носов // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 3 (88). – С. 58–66.

8. **Савин, Л. О.** Анализ определяющих параметров и возможностей использования гибких стратегий технического обслуживания для повышения надежности автомобильной техники при ее эксплуатации в особых условиях / Л. О. Савин, М. В. Королёв, М. В. Носов // Научный результат. Информационные технологии. – 2017. – № 2. – С. 9–20.

9. **Савин, Л. О.** Применение метода критических сечений при прогнозировании надежности изделий / Л. О. Савин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2019. – № 6. – С. 34–38.

10. **Савин, Л. О.** Обоснование показателей эффективности функционирования автомобильной техники в особых условиях ее эксплуатации / Л. О. Савин, М. В. Королёв // Современные инновации в науке и технике: сборник материалов 8-й Всероссийской научно-технической конференции (19–20.04.2018). – Курск, – 2018. – С. 201–205.

11. **Савин, Л. О.** Прогнозирование технического состояния автомобильной техники

при ее эксплуатации в различных условиях / Л. О. Савин, М. В. Королёв, П. А. Сысоев // САМИТ : сборник материалов IX Международной научно-технической конференции (26–27.10.2017). – Курск, – 2017. – С. 76–78.

12. **Савин, Л. О.** Организация технического обслуживания автомобильной техники с учетом природно-климатических условий ее эксплуатации / Л. О. Савин, М. В. Королёв // САМИТ : сборник материалов X Международной научно-технической конференции (26–27.10.2018). – Курск, – 2018. – С. 215–217.

13. **Савин, Л. О.** Управление параметрами ТО АТ при различных дорожно-транспортных условиях ее эксплуатации / Л. О. Савин, М. В. Королёв, П.А. Сысоев // САМИТ: сборник материалов XI Всероссийской межведомственной научной конференции (14–16.04.2019). – Орёл, – 2019. – С. 79–80.

14. **Савин, Л. О.** Алгоритм и методика управления периодичностью технического обслуживания автомобильной техники при ее эксплуатации в особых условиях / Л. О. Савин, М. В. Королёв, А.Н. Новиков // сборник материалов 6-й международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте» (20.05.2020). – Орёл, – 2020. – С. 229–235.

Патентные материалы

15. **Савин, Л. О.** Устройство для повышения точности определения остаточного ресурса двигателя внутреннего сгорания: пат. 188936 Российская Федерация: МПК G01 M15/04 / Савин Л. О. [и др.]. – № 2019101857; заявл. 24.01.19; внесена в Реестр полезных моделей РФ 29.04.19; опубл. 29.04.19, бюл. № 13. – 11 с.

16. **Савин, Л. О.** Устройство для обеспечения определения количества резервных элементов системы: пат. 183386 Российская Федерация: МПК G06 F15/20 / Савин Л. О. [и др.]. – № 2018106094; заявл. 19.02.18; внесена в Реестр полезных моделей РФ 19.09.2018; опубл. 19.09.18, бюл. № 26.

17. **Савин, Л. О.** Программа для определения оптимальной периодичности технического обслуживания изделий: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018615112 Российская Федерация / Савин Л. О. [и др.]. – № 2018612324; заявл. 07.03.2018; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26.04.2018.

18. **Савин, Л. О.** Программа для расчета показателей надежности агрегатов и систем АТ при ее эксплуатации в различных условиях: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018663681 Российская Федерация / Савин Л. О. [и др.]. – № 2018660724; заявл. 04.10.2018; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 01.10.2018.

Подписано в печать _____.2022 г. Формат 30×42/4. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,03. Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано в типографии

Орёл – 2022