

На правах рукописи



АРИФУЛЛИН Илья Владимирович

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ КОМПЛЕКСНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЗАПАСНЫМИ ЧАСТЯМИ СПЕЦИАЛЬНОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ
ТЕХНИКИ В АЭРОПОРТАХ**

Специальность 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (СПбГАСУ)

Научный консультант:

Евтюков Сергей Аркадьевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Новиков Иван Алексеевич,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова», проректор по
цифровой трансформации и образовательной
деятельности;

Дорохин Сергей Владимирович,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный лесотехнический
университет им. Г.Ф. Морозова», профессор
кафедры автомобилей и сервиса;

Ризаева Юлия Николаевна
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«МИРЭА – Российский технологический
университет», профессор кафедры
индустриального программирования.

Ведущая организация:

**ФГБОУ ВО «Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора
Александра I»**

Защита диссертации состоится «17» декабря 2026 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.05 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (СПбГАСУ) по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4, аудитория 220.

Тел./факс: (812) 316-58-73; эл. почта: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialty/personal/arifullin-ilya-vladimirovich>

Автореферат разослан «21» сентября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Репин С. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Функционирование современной аэропортовой инфраструктуры невозможно без непрерывного цикла технического обслуживания специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортовых комплексах. Критическим элементом производственной цепи, определяющим коэффициент готовности парка и экономическую эффективность авиатранспортного узла, с учётом непосредственного влияния на соблюдение расписания полётов, пропускную способность аэродрома и общую безопасность авиационных перевозок, выступает эффективное материально-техническое обеспечение. В этой связи эффективная организация процесса доставки запасных частей является обязательным требованием для выполнения качественного технического обслуживания и ремонта специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах Российской Федерации. По мере технического и морального износа специальной автомобильной техники отечественного и иностранного производства, эксплуатируемой в аэропортах, возникает потребность в регулярных и систематизированных поставках запасных частей.

В соответствии с утверждённой Транспортной стратегией Российской Федерации до 2030 года мониторингу, предиктивному техническому обслуживанию и ремонту транспортных средств уделяется отдельное внимание. Проблема обеспечения системного подхода к поставкам запасных частей определяется несколькими ключевыми аспектами:

- *Разномарочность по типам производителей и разнородность по специализации автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах.* Это приводит к необходимости обеспечения разномарочной техники оригинальными агрегатами и запасными частями. Данная проблема усугубляется современными условиями геополитической нестабильности, приводящей к ограничениям в доступности запасных частей ряда иностранных производителей.

- *Сертификация организаций, производящих отечественную автомобильную технику для аэропортов, с точки зрения соответствия государственных технических нормативов международным стандартам.* Эксплуатирующие организации зачастую используют технику иностранного производства (такая техника в среднем эксплуатируется 10–20 лет). Обслуживание зарубежной техники предъявляет высокие требования к качеству запасных частей и комплектующих, а также к квалификации персонала для её обслуживания. На современном рынке специальной автомобильной техники представлены отечественные, европейские, американские и китайские производители.

- *Интенсивная эксплуатация специальной автомобильной техники, имеющей значительные возрастные характеристики.* Данный фактор за-

частую приводит к нарушению действующих регламентов и является дестабилизирующим фактором в системе технического обслуживания и ремонта.

Перечисленные аспекты проблемы обеспечения специальной автомобильной техники отечественного и иностранного производства, эксплуатируемой в аэропортах, запасными частями усугубляются необходимостью поддержания её работоспособного состояния не только с точки зрения экономической эффективности, но и обеспечения безопасности эксплуатации.

В настоящее время большинство технических служб аэропортов работают по системе «закупка по необходимости». Заказ на транспортировку и доставку необходимых для продолжения работы запасных частей и сырья производится в момент или при приближении момента окончания индивидуальной пригодности узла, агрегата или их запаса. Сигналом к необходимости пополнения запаса запасных частей обычно служат результаты диагностирования специальной автомобильной техники и обнаружение неисправностей.

Однако, ввиду географического нахождения производителей требуемых узлов и агрегатов прогнозирование оптимального времени доставки запасных частей становится невозможным. Для минимизации времени простоя специальной автомобильной техники в техническом обслуживании и ремонте предприятия стараются запастись запасными частями «впрок». Такой подход частично решает проблему, но является неэффективным в контексте логистики управления капиталовложениями, выделяемыми на содержание специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах. Более эффективной логистической системой является система «точно в срок», когда необходимые для технического обслуживания и ремонта детали доставляются в момент неисправности или по мере необходимости, так как она обеспечивает минимальные потребности в хранении и содержании агрегатов и отсутствие простоев в ожидании запасных частей.

Перечисленные условия требуют формирования сложной, с точки зрения природы факторов влияния и комплексной с точки зрения количества исследуемых параметров системы организации обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах.

Ввиду достаточно большого набора нестабильных во времени-информационных составляющих исследуемого процесса, его можно охарактеризовать как процесс с неопределёнными вероятностными составляющими.

Формирование эффективной системы обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах, требует разработки специализированных математических алгоритмов расчёта всех параметров обеспечения запасными частями,

учитывающих сроки поставок определённых запасных частей, ресурсоёмкость мероприятий по их установке, расчётные расходы на содержание, доставку, простой единиц эксплуатируемой техники, вероятную прибыль от инвестирования отложенных расходов и потери при непрогнозируемом откате.

Решение проблемы возможно на основе разработки комплексной методологии обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах, основанной на специальных аналитических инструментах имитационного моделирования, содержащих модели вероятностного прогноза времени отказа и ресурса запасных частей на основе статистического анализа работы аэропортов за последние несколько лет. Внедрение такой методологии в производство алгоритма позволит определять возможные сроки возникновения неисправностей, необходимое время на доставку и монтаж необходимых запасных частей и точно указывать на моменты времени, когда необходимо осуществлять закупку и снабжение парка специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах, необходимыми деталями. Данная система позволит обеспечить комплексное взаимодействие между подсистемой технического обслуживания и ремонта, специализированными техническими службами аэропортов и подсистемой организации перевозок и логистики.

Степень разработанности темы исследования. Значительный научный вклад по сформулированной теме исследования внесли такие авторы, как Л.Л. Афанасьев, И.И. Батицев, В.М. Беляев, Л.А. Бронштейн, В.Д. Волков, В.В. Донченко, В.В. Дыбская, А.В. Комаров, В.А. Корчагин, Лукинский, С.В. Милославская, Л.Б. Миротин, А.Г. Некрасов, С.М. Резер, В.И. Сарбаев, Т.С. Титова, И.А. Новиков, Ю.Н. Ризаева, С.В. Дорохин, Н.А. Троицкая, С.С. Ушаков, Г.В. Фролов, Н.С. Цурков, А.А. Чеботаев, С.А. Евтюков, А.В. Терентьев, О.Н. Ларин, В.В. Зырянов, И. Ансофф, Дж.С. Джонсон, Э. Мате и др. Научные работы этих авторов послужили основой для формулирования научной новизны, постановки задач исследования, анализа и оценки эффективности организации работы разрабатываемого транспортного комплекса по техническому обслуживанию и ремонту техники, а также доставке запасных частей.

В исследованиях известных ученых рассматриваются математические модели систем управления запасами, детализируются концепции «точно в срок» и «логистика быстрого реагирования», однако специфические прикладные вопросы исследования организации комплексного научного подхода к решению задачи обеспечения совокупностью аэропортов на отраслевом уровне материальными ресурсами не были решены.

Разработка метода как совокупности решений обоснованного множества частных задач, связанных общей целью – организацией интегрирован-

ной транспортно-логистической системы, позволила бы обеспечить координацию поставщиков специальной автомобильной техники (дилерские центры) и конечных потребителей (специализированные службы аэропортов) с целью сокращения времени и издержек при транспортировке запасных частей, повысила бы эффективность работы служб технической эксплуатации специальной автомобильной техники аэропортов и, в конечном счете, безопасность авиаперевозок.

Цель исследования – разработка методологии обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах, основанной на интегрированной транспортно-логистической системе, учитывающей параметры организации перевозки и технического обслуживания и ремонта.

Задачи исследования:

1. Разработать модель вероятностного прогноза времени отказа и ресурса запасных частей на основе статистического анализа работы аэропортов за последние годы.

2. Разработать математическую модель прогнозирования отказов узлов и агрегатов специальной автомобильной техники как элемента «входа» проектируемой транспортно-логистической системы обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах.

3. Разработать показатели, необходимые для формирования специализированной базы данных запасных частей специальной автомобильной техники с целью дальнейшего её использования в имитационном моделировании прогноза необходимых сроков доставки запасных частей специальной автомобильной техники.

4. Разработать алгоритм и программное обеспечение, автоматизирующее процесс определения оптимальных сроков снабжения запасными частями специальной автомобильной техники для минимизации времени простоя парка.

5. Разработать комплексную методологию обеспечения специальной автомобильной техники аэропортов запасными частями, основанную на аналитических инструментах имитационного моделирования.

6. Апробировать разработанный алгоритм и программное обеспечение на статистических данных взаимодействия систем технического обслуживания, ремонта и обеспечения запасными частями в целях прогнозирования времени снабжения, технического обслуживания и ремонта специальной автомобильной техники аэропортов.

7. Определить экономическую эффективность и разработать стратегию применения комплексной методологии обеспечения специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах, основанную на аналитических инструментах имитационного моделирования.

Объект исследования – комплексная система обеспечения запасными частями, синтезируемая как совокупность транспортно-логистической подсистемы и подсистемы технического обслуживания и ремонта специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах.

Предмет исследования – методы имитационного моделирования процессов в сложных прогностических системах синтеза транспортно-логистических и технико-эксплуатационных подсистем.

Научная новизна исследования заключается в достижении следующих оригинальных результатов:

1. Разработан метод получения моделей вероятностного прогноза времени отказа и ресурса запасных частей, на основе статистических данных по эксплуатации специальной автомобильной техники в аэропортах.

2. Разработана математическая модель прогнозирования отказов узлов и агрегатов специальной автомобильной техники как элемента «входа» проектируемой транспортно-логистической системы обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах.

3. Разработана архитектура базы данных техники и запасных частей с целью дальнейшего её использования в имитационном моделировании прогноза необходимых сроков доставки запасных частей для специальной автомобильной техники.

4. Разработан алгоритм определения оптимальных сроков снабжения запасными частями специальной автомобильной техники для минимизации времени простоя парка.

5. Разработана комплексная методология обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах, основанная на аналитических инструментах имитационного моделирования.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что разработаны научные основы, позволяющие спроектировать эффективную систему эксплуатации специальной автомобильной техники путем объединения двух подсистем: технического обслуживания и ремонт техники и своевременное обеспечение (доставка) запасных частей для осуществления технического обслуживания и ремонта.

Практическая значимость заключается в разработке программного обеспечения, позволяющего оцифровать математическую модель принятия управленческих решений в комплексной системе поставок запасных частей, технического обслуживания и ремонта специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах.

Методология и методы исследования основываются на системном анализе теории управления запасами, теории случайных процессов, имита-

ционного моделирования, статистических методов и методов теории принятия решений в условиях неопределенности, сетей массового обслуживания и других методов многомерного анализа.

Положения, выносимые на защиту:

1. Концепция метода комплексного обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах.

2. Алгоритм программного обеспечения, реализующий модель информационно-логистической системы в подсистемах перевозки запасных частей и технического обслуживания и ремонта специальной автомобильной техники.

3. Результаты апробации вычислительного эксперимента на основе разработанного программного обеспечения.

4. Оценка эффективности разработанного метода комплексного обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах.

5. Комплексная методология комплексного обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники в аэропортах.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 2.9.5 – Эксплуатация автомобильного транспорта, а именно пунктам 2, 16, 17.

Личный вклад автора. Все основные идеи, положенные в основу создания методологии комплексной системы обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники в аэропортах, принадлежат автору.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается теоретическими и экспериментальными исследованиями, а именно: эффективным использованием современного математического аппарата, методов системного анализа и методологии решения оптимизационных задач; отсутствием противоречий с данными, полученными ранее в исследованиях другими авторами по данной тематике; публикациями автора в изданиях, рецензируемых ВАК РФ.

Апробация работы. Результаты исследования доложены, обсуждены и одобрены на:

XV, XVI Международной конференции «Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах», г. Санкт-Петербург, 2024–2025 гг.;

X, XI, XII Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте», г. Орёл, 2024–2026 гг.;

XII Международной научно-практической конференции «Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса», г. Горловка, 2026 г.

75–83 международные научно-методические и научно-исследовательские конференции МАДИ, г. Москва, 2017-2025 гг.;

Результаты исследования используются в учебном процессе МАДИ и СПбГАСУ при реализации практических и лабораторных занятий по дисциплинам «Построение информационных систем на автомобильном транспорте», «Силовые агрегаты», «Транспортная телематика», «Безопасность дорожного движения», «Интеллектуальные транспортные системы», «Анализ транспортной деятельности предприятия». Разработанная комплексная система обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники в аэропортах используется в ряде организаций: ЗАО «Универсал-Аэро», ООО «Русский Сертификационный Центр», ООО «Технический центр «Восток», ООО «Миларин».

Организациями представлены акты о внедрении научных результатов диссертационного исследования.

Публикации. Основные положения диссертации изложены в 42 работах общим объемом 37 п.л. (авторских – 20 п.л.), в том числе 33 – в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ, 5 – в международных индексируемых базах Scopus и Web of Science. Издана 1 монография, 2 учебных пособия.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем составляет 311 страниц машинописного текста. Библиография содержит 208 наименований.

Во введении обосновывается тема исследования, востребованность практикой решения задачи оптимизации процесса поставок запасных частей для специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах, её выбор и актуальность. Формируется цель исследования, определяются частные задачи исследования, элементы научной новизны и практическая ценность работы, а также излагаются положения, выносимые на защиту.

В первой главе определены основные характеристики и номенклатура существующего парка наземной техники аэропортов, установлено, что более 90% парка использует автомобильное шасси – это автомобили специального назначения. Рассмотрены экстремальные сценарии организации снабжения технической службы аэропортов запасными деталями, оценена эффективность вариантов и определена оптимальная схема обслуживания, требующая сложного математического анализа прогнозирования отказов в работе специальной автомобильной техники. Проанализированы методы,

позволяющие оценить вероятность состояния системы надёжности и отказов в работе агрегатов специальной автомобильной техники. Изучены возможности определения вероятности отказов, интенсивности потока отказов и плотности потока отказов.

Во второй главе приведен обзор концепций управления запасами и производством, с акцентом на концепцию «точно в срок». Установлено, что системы, базирующиеся на идеологии «точно в срок», используют гибкие производственные технологии для выпуска небольших партий готовой продукции с широким ассортиментом на основе раннего прогнозирования. Описаны различные подходы к имитационному моделированию с акцентированием внимания на статистическом (численном) моделировании как одной из разновидностей.

В третьей главе создан алгоритм работы имитационной модели наработки узлов и изделий в зависимости от имеющихся статистических данных о предшествующей работе системы и/или аналогичных систем, доказана нормальность распределения дневной производительности специальной автомобильной техники в аэропортах. Разработана модель имитации отказов техники в зависимости от вероятности отказа узлов и отношения текущей наработки к назначенному ресурсу узлов при имитационном моделировании наработки. Определена нормальная сущность вероятности появления отказа, зависимость определения отказа внедрена в математическую модель для определения моментов времени отказа от даты начала моделирования.

В четвёртой главе разработано программное обеспечение с графическим интерфейсом, имеющее возможности внесения статистических данных с конкретного предприятия в собственных условиях эксплуатации, внесения данных возможных поставщиков запасных частей на указанные агрегаты специальной автомобильной техники и вывода данных в виде отчётных форм и в графическом представлении в виде графика частот отказов на определённые сроки эксплуатации. Описано применение метода при выборе поставщиков запасных частей и доказано изменение в сторону повышения эффективности результатов принятия решений при использовании моделирования с целью исключения критерия срока поставки из задачи принятия решения.

В пятой главе был проведён расчёт прикладного использования разработанной модели наработки узлов и агрегатов специальной автомобильной техники для предупреждения отказов и планирования ремонта. Описаны требования к интеграции системы моделирования наработки узлов и агрегатов специальной автомобильной техники для предупреждения отказов и планирования ремонта.

В заключении изложены основные выводы, результаты и итоги выполненного исследования.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

Концепция логистического снабжения «точно в срок» для потока замен запасных частей специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах

Концепция «точно в срок» – широко распространенная логистическая концепция, которая является неотъемлемой составляющей эффективного производства. Она направлена на создание сбалансированной производственной системы с плавным и быстрым материальным потоком, которая может эффективно функционировать при минимальном уровне запасов. В сфере эксплуатации типовой техники система «точно в срок» должна быть интегрирована с понятием «жизненный цикл» машины, зависящим от «жизненного цикла» запасных частей. Исследуя жизненный цикл запасной части, можно выделить несколько физических этапов с точки зрения эксплуатации детали (рис. 1).



Рисунок 1 – Жизненный цикл деталей в рамках предприятий, эксплуатирующих специальную автомобильную технику в аэропортах

1. Приобретение запасных частей для техники – момент времени, когда техническая служба аэропорта приобрела и начала ведение запасной части в рамках предприятия.

2. Прибытие на производство – момент времени, когда деталь полностью прошла процедуру транспортировки, приёмки и введения на баланс и готова к дальнейшей работе внутри предприятия.

3. Возникновение потребности в детали – момент времени, когда произошёл отказ в работе подсистемы специальной автомобильной техники, из-за чего автотранспортное средство нуждается в ремонте и замене агрегатов.

4. Установка детали взамен отработавшей – момент времени, когда автотранспортное средство, находящееся в ремонте, полностью завершило своё обслуживание и готово к дальнейшей эксплуатации.

5. Отработка и ликвидация – момент отказа детали и необходимость в дальнейшем обслуживании другими частями, отказавшая деталь ликвидируется (списывается), и больше не содержится на предприятии.

Время между описанными этапами классифицируется как:

1. Время доставки – время, затрачиваемое на все логистические процессы по доставке детали от продавца (завод–изготовитель, компания–продавец и т.п.) до покупателя (технической службы аэропортов).

2. Время хранения – интервал времени, в котором нет потребности в применении запасной части, но она находится на балансе предприятия и готова к применению в любой момент.

3. Время ремонта – время, затрачиваемое на восстановление работоспособности автотранспортного средства, включает в себя диагностику с выявлением причины отказа специальной автомобильной техники, его ремонта и замены необходимых для продолжения работы агрегатов.

4. Время работы – время, во время которого деталь, установленная на агрегат, выполняет свою работу, вследствие чего автотранспортное средство может свободно эксплуатироваться.

Анализируя промежутки между знаковыми событиями в жизненном цикле работы детали, очевидно, что сокращение одних и увеличение других промежутков времени приводит к более высокой эффективности её отработки. Так деталь, находившаяся в работе дольше, будет более эффективна, чем та, которая отслужила меньший срок. От системы снабжения возможно влияние на время доставки и хранения, которые в идеальных условиях должны быть минимальны, при полной ликвидации времени хранения, заказывая запасные части в момент возникновения потребности, наблюдается жизненный цикл на рисунке 2.



Рисунок 2 – Жизненный цикл деталей при закупке после возникновения потребности в запасных частях на предприятиях, эксплуатирующих специальную автомобильную технику в аэропортах

Система определения моментов необходимости заказа и прибытия запасных частей специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах

Алгоритм работы имитационной модели прогнозирования отказа узлов специальной автомобильной техники включает в себя следующие этапы:

1. Ввод исходных данных: данные о диагностике и техническом обслуживании специальной автомобильной техники; данные о наработке узлов агрегатов специальной автомобильной техники.
2. Определение функции вероятности отказа узла агрегата специальной автомобильной техники на основе данных наработки и корректировки диагностических данных.
3. Установка предельных значений вероятности отказа для каждого узла агрегата специальной автомобильной техники.

4. Имитационное моделирование процесса эксплуатации транспортных средств, учитывающее время работы и ремонт узлов агрегатов специальной автомобильной техники в соответствии с их функциями вероятности отказа.

5. При достижении установленных предельных значений вероятности отказа для какого-либо узла агрегата специальной автомобильной техники: генерация сигнала о необходимости ремонта или замены данного узла, информация о требуемом ремонте или замене конкретного узла с указанием его типа и момента времени, когда эта операция должна быть выполнена для предотвращения отказа.

6. Оценка реальных убытков, связанных с хранением запасных частей, и прогнозирование затрат на них на основе фактического расхода за прошлый период (месяц, квартал, год).

7. Определение параметров удельных затрат на использованные запасные части при ремонте, отнесенных к количеству обслуженной техники, без учета затрат на сам ремонт.

8. Выход – информация о требуемых ремонтах или замене узлов агрегатов специальной автомобильной техники и прогнозируемые затраты на запасные части для их обслуживания.

Модель должна предоставлять достоверные результаты с заданной точностью, основанные на статистических данных о средних сроках службы и наработки каждого отдельного агрегата. Однако с практической точки зрения, создание подобных распределений зачастую не является возможным ввиду недостаточного объема данных, отсутствия информации о надёжности изделия от завода-изготовителя и/или поставщика, а также высокой доли влияния условий работы и эксплуатации.

Такой алгоритм приведен на рисунке 3.

Для решения этой проблемы предлагается разработка усреднённого закона распределения вероятности отказа узла в зависимости от текущей наработки и максимального ресурса.

В общем виде закон имеет вид:

$$p_{\text{отк}} = f\left(\frac{E}{E_{\text{max}}}\right) = f(K) \quad (1)$$

где $p_{\text{отк}}$ – вероятность отказа узла или агрегата; E – текущая наработка; E_{max} – максимальный ресурс; K – доля выработки ресурса.

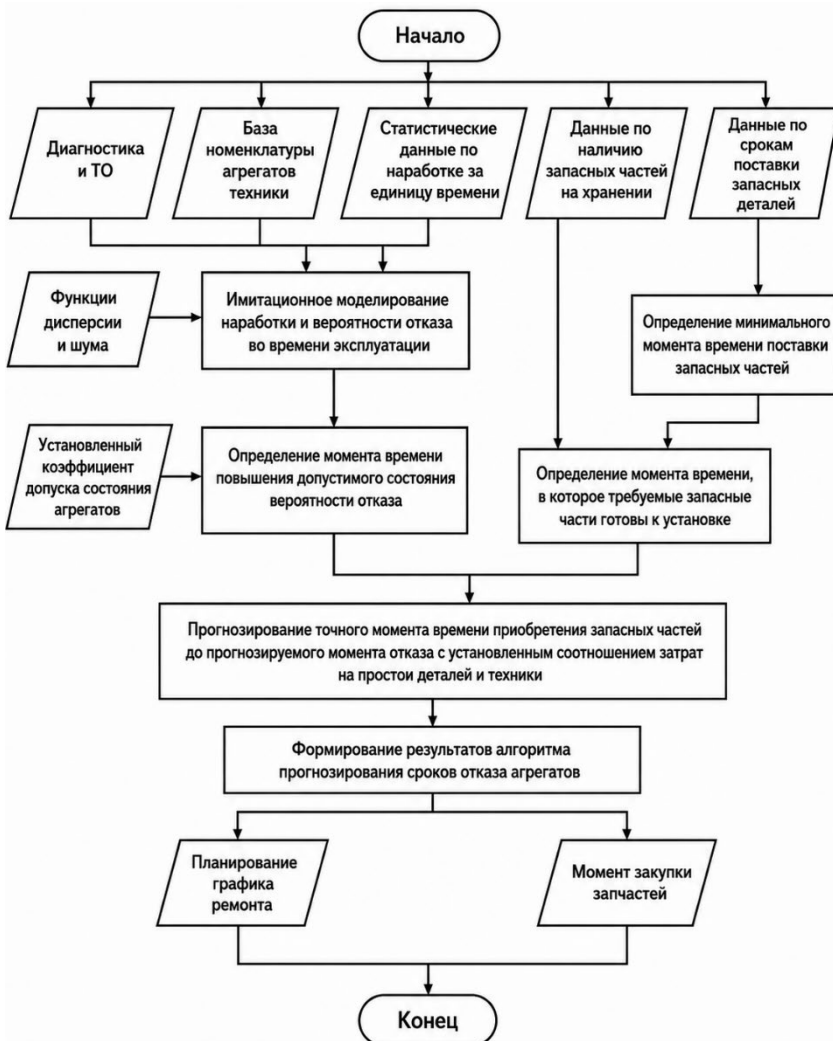


Рисунок 3 – Схема прогнозирования моментов отказа агрегатов специальной автомобильной техники

Создание такого распределения требует учёта множества данных о моментах отказа деталей по всей технике аэропортов. Так как величина максимального ресурса зачастую устанавливается как величина гарантированной работы узла, она не может сопоставляться со значением 100% вероятности отказа. Ежедневное моделирование также требует создания определённых функций дисперсии и шума ввиду практической нереализуемости единой ежедневной нагрузки. В любой выбранный день определённые агрегаты могут вырабатывать больше или меньше своего ресурса относительно средней величины. Согласно данным общей теории вероятностей, такое распределение зачастую имеет нормальный характер и может быть описано гауссовским распределением. Выбор единицы измерения наработки зависит от конкретного типа работы агрегата.

Узлы, обеспечивающие двигательную работу специальной автомобильной техники, могут описываться в единицах измерения длины как характеризующие пробег транспортного средства, например, для перронных автобусов, топливозаправщиков, водовозов и т.п. Для специальной автомобильной техники, выполняющей гидравлическую работу для поднятия и спуска других технических средств или пассажиров, таких как трапы, автокраны, может использоваться количество циклов работы «сжатия» и «разжатия» системы. Для узлов линейного продолжительного использования, таких как ленточные конвейеры, автоэскалаторы и т.п., в качестве единицы измерения может быть использовано время.

Такой подход к определению вероятности отказа узлов может обеспечить возможность создания распределения вне зависимости от специфики единицы измерения, так как данные о разных видах наработки взаимоисключают друг друга.

Алгоритм системы приведен на рисунке 4.

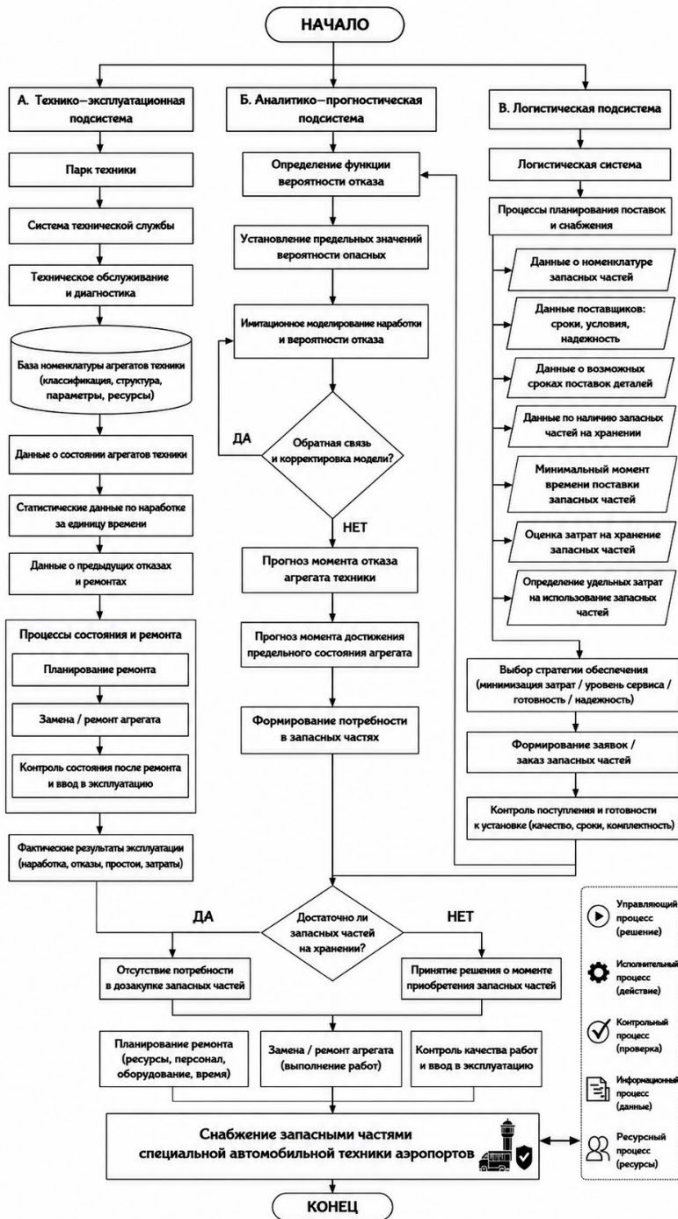


Рисунок 4 – Алгоритм работы системы снабжения специальной автомобильной техники аэропортов на примере Московского авиационного узла

При реализации системы «точно в срок» возможен обход сравнения наличия запасных частей на хранении ввиду постоянных закупок по мере необходимости, а при комбинированной системе с использованием параметра допуска возможна предварительная закупка с ожиданием выхода агрегата из строя.

При рассмотрении сроков поставки потребных запасных частей от поставщика стоит использовать пессимистический сценарий максимальной задержки поставки, чтобы нейтрализовать вероятностную составляющую моделирования. Из-за случайности имитации каждодневной работы использование модели не оптимально для прогнозирования отказов новых или мало отработавших агрегатов, так как влияние дисперсии наработки с каждым днём накапливается, что приводит к высоким погрешностям при имитации множества лет. Оптимальной точкой начала мониторинга результатов работы алгоритма является середина жизненного цикла детали, после чего возможно обновление результатов при повторном прохождении ТО и уточнении текущего уровня наработки и технического состояния агрегата. При рассмотрении узлов, входящих в структуру большого агрегата и работающих как целостная система, целесообразно исследование всего агрегата в целом, так как работа его отдельных узлов сказывается на работе других. Также зачастую поломка таких узлов может привести не только к неработоспособности агрегата в целом, но и к отказу других узлов данной системы ввиду превышения допустимых нагрузок. В целом к подбору исходных данных стоит относиться с наиболее приближенным к среднему, но пессимистичным подходом ввиду превосходства потерь от простоя всего транспортного средства над простым отдельными запасных частей.

Прикладное математическое обеспечение имитационного аппарата для моделирования наработки и прогнозирования отказов деталей специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах.

Для оценки значения вероятности отказов построим график зависимости количества отказов от отношения текущей наработки к назначенному ресурсу изделия. Такое распределение приведено на рисунке 5. На графике наблюдается резкий скачок отказов в зоне от 0% до 20% наработки, что отражает отказы элементов, поступивших на предприятие как бракованные, установленные и эксплуатируемые с очевидной ошибкой, зависимые отказы от других поломок или полученные в ходе аварийных ситуаций, вызванных отказом других систем или человеческого фактора. Такие отказы слабо зависимы от наработки изделия и характеризуются их качеством, условиями эксплуатации и внешними факторами.

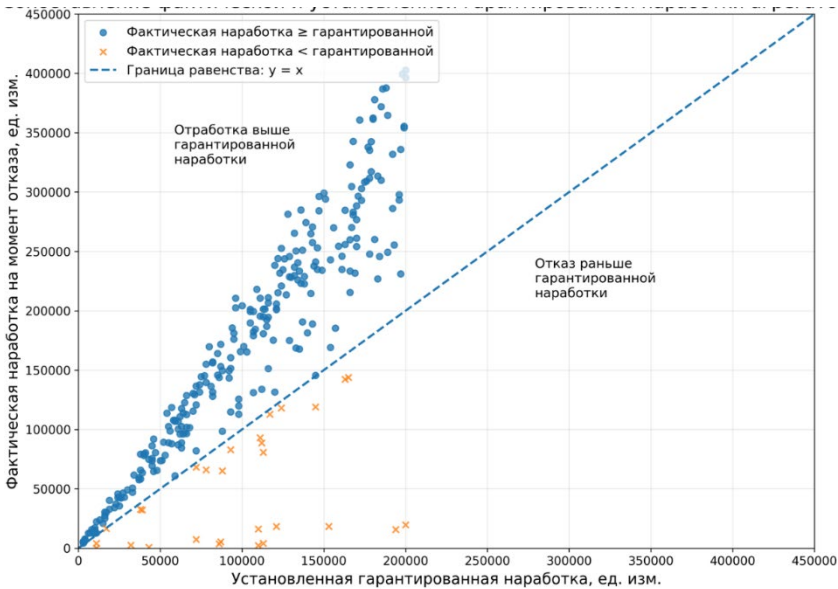


Рисунок 5 – График зависимости количества отказов от отношения текущей наработки к назначенному ресурсу изделия: по X – установленная гарантированная наработка; по Y – фактическая наработка на момент отказа; по XY – диагональ, демонстрирующая отказ до/после гарантированного срока

Некоторые отказы в зоне от 20% до 80% вызваны условиями эксплуатации агрегатов специальной автомобильной техники или зависимыми от отказами от внешних факторов. Эти отказы имеют некоторую зависимость от наработки, однако вероятнее связаны с обстоятельствами, не связанными с качеством самого изделия, а с условиями эксплуатации. После порога в 80% наблюдается значительное увеличение потока отказов элементов. Для большинства деталей это связано с приближением к назначенному ресурсу и напрямую зависит от него. После работы сверх назначенного ресурса наблюдается значительное увеличение частоты отказов, плавно возрастающее вплоть до 180%.

Очевидно влияние переработки агрегата выше нормативного ресурса и приближение к его выходу из строя. После выработки свыше 180% ресурса детали наблюдается снижение количества отказов, связанное с уменьшением общего количества деталей, доработавших до таких значений относительной наработки. При сглаживании кривой выборки наблюдается зависимость, похожая на показательную функцию отношения наработки к назначенному ресурсу. Сглаженный график этой зависимости приведён на рисунке 6.

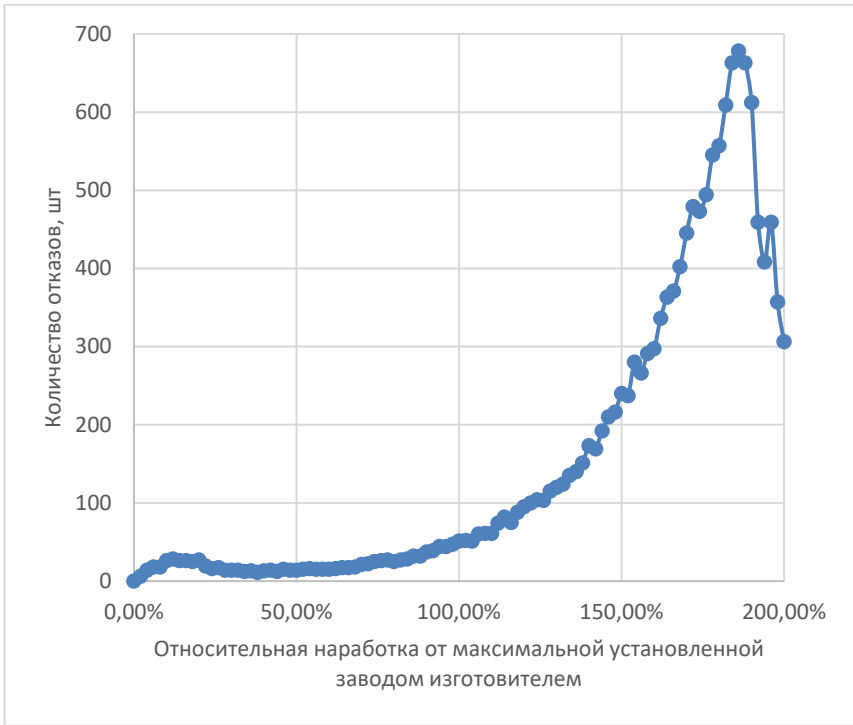


Рисунок 6 – График зависимости количества отказов агрегатов техники от отношения текущей наработки к назначенному ресурсу изделия

Имея представление о характере кривой зависимости, возможно сделать заключение о виде и характере функции данной зависимости. Прежде стоит исключить зону преждевременных отказов как слабо зависящую от отношению наработки от назначенного ресурса и зону чрезмерной переработки за счёт малого количества элементов, доработавших до таких значений. Так как количество отказов возможно с помощью стохастического преобразования привести к вероятности отказа путём математических преобразований, получаем уравнение:

$$p_{\text{отк}} = \frac{\left((E_{\text{наз}})^{\frac{1}{E_{\text{max}}}} \right)^E}{E_{\text{наз}}} = \frac{E_{\text{max}} \sqrt{E_{\text{наз}}}^E}{E_{\text{наз}}} \quad (2)$$

где, E_{max} – максимальный статистический ресурс изделия (статистически определённый для данной группы изделий как $2 \cdot E_{\text{наз}}$); $E_{\text{наз}}$ – назначенный ресурс изделия; E – текущая наработка детали.

Доля выработки ресурса (K) определяется как отношение текущей наработки детали к назначенному ресурсу:

$$K = \frac{E}{E_{\text{наз}}} \quad (3)$$

Тогда:

$$p_{\text{отк}(K)} = \frac{\left((E_{\text{наз}})^{\frac{1}{2 \cdot E_{\text{наз}}}} \right)^{K \cdot E_{\text{наз}}}}{E_{\text{наз}}} = \frac{2 \cdot E_{\text{наз}} \sqrt{E_{\text{наз}}^{K \cdot E_{\text{наз}}}}}{E_{\text{наз}}}, \text{ при } 0 \leq K \leq 2, E_{\text{наз}} > 0 \quad (4)$$

Общий вид поверхности изображён на рисунке 7.

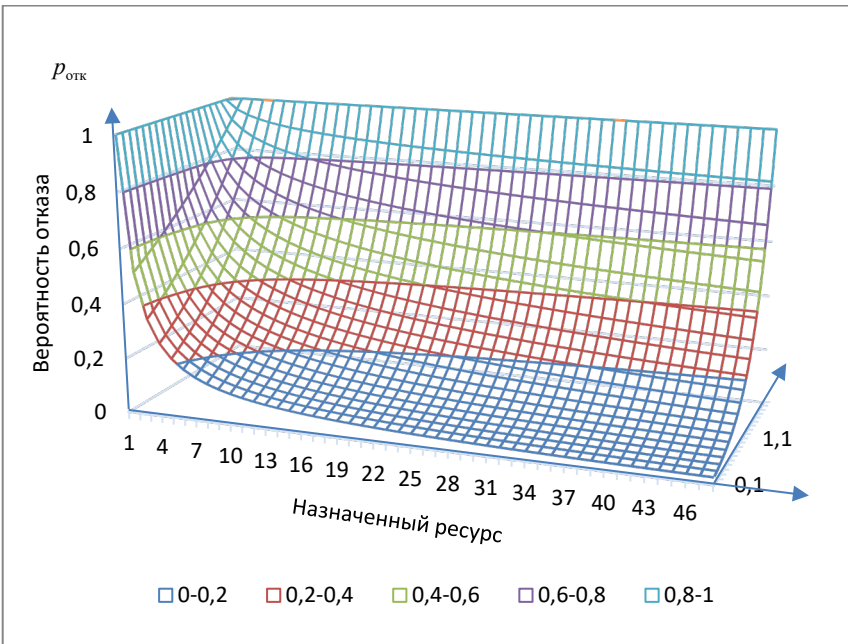


Рисунок 7 – График зависимости вероятности отказа агрегатов техники к назначенному ресурсу (при $1 \leq E_{\text{наз}} \leq 48$)

На практике значения изделий, работа которых измеряется в показателях менее 1000, например, в штучных замерах, малоэффективны и отслеживание технического состояния таких изделий проводится отдельно от общего потока. В ходе статистической обработки значения назначенного ресурса колебались в пределах от 10000 до 200000.

График данной области приведён на рисунке 8.

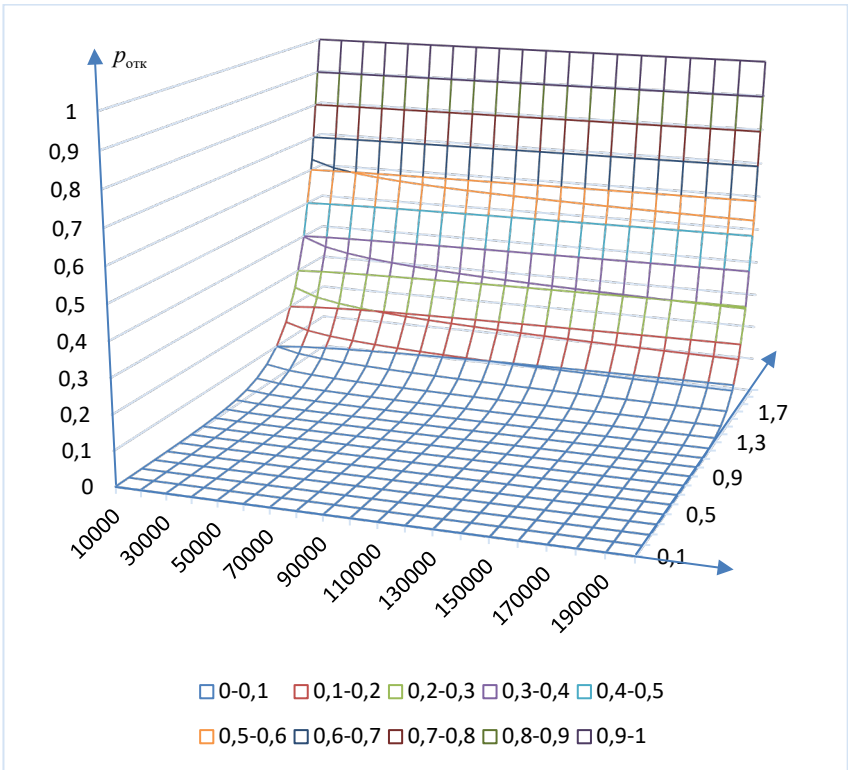


Рисунок 8 – График зависимости вероятности отказа агрегатов техники к назначенному ресурсу (при $10000 \leq E_{\text{наз}} \leq 20000$)

Такие рамки ресурса характерны для автотранспортной отрасли, например, замера километража и пробега. Очевидно, что при увеличении размерности единиц измерения полезной работы агрегатов увеличивается и точность прогнозирования и симуляции.

Для определения скорости возрастания значения показателя вероятности отказа возьмём первую производную функции $p_{\text{отк}}$.

Пусть $K \cdot E_{\text{наз}} = x$ – текущая наработка, возьмём производную по:

$$p'_{\text{отк}} = \left(\frac{\left(E_{\text{наз}}^{\frac{1}{2 \cdot E_{\text{наз}}}} \right)^x}{E_{\text{наз}}} \right)' \quad (5)$$

1) $\frac{1}{E_{\text{наз}}}$ – постоянный множитель

$$p'_{\text{отк}} = \frac{1}{E_{\text{наз}}} \left(\left(E_{\text{наз}}^{\frac{1}{2 \cdot E_{\text{наз}}}} \right)^x \right)' \quad (6)$$

$$2) \left(E_{\text{наз}}^{\frac{1}{2 \cdot E_{\text{наз}}}} \right)^x \text{ – степенная функция,} \quad (7)$$

$$\text{производная} \left(E_{\text{наз}}^{\frac{1}{2 \cdot E_{\text{наз}}}} \right)^x \cdot \ln \left(E_{\text{наз}}^{\frac{1}{2 \cdot E_{\text{наз}}}} \right) \quad (8)$$

Упростим правую часть:

$$\ln \left(E_{\text{наз}}^{\frac{1}{2 \cdot E_{\text{наз}}}} \right) = \frac{1}{2 \cdot E_{\text{наз}}} \cdot \ln(E_{\text{наз}}) = \frac{\ln(E_{\text{наз}})}{2 \cdot E_{\text{наз}}} \quad (9)$$

Итоговая производная:

$$p'_x = \frac{1}{E_{\text{наз}}} \cdot \left(E_{\text{наз}}^{\frac{1}{2 \cdot E_{\text{наз}}}} \right)^x \cdot \frac{\ln(E_{\text{наз}})}{2 \cdot E_{\text{наз}}} = \frac{\left(E_{\text{наз}}^{\frac{1}{2 \cdot E_{\text{наз}}}} \right)^x \cdot \ln(E_{\text{наз}})}{2 \cdot E_{\text{наз}}^2} \quad (10)$$

$$v_{p_{\text{отк}}} = \frac{2 \cdot E_{\text{наз}} \sqrt{E_{\text{наз}}} \cdot \ln E_{\text{наз}}}{2 \cdot E_{\text{наз}}} = p_{\text{отк}} \frac{\ln E_{\text{наз}}}{2 E_{\text{наз}}} \quad (11)$$

где, $v_{p_{\text{отк}}}$ – скорость изменения вероятности отказа в зависимости от текущей наработки

График такой функции приведён на рисунке 9 при $E_{\text{наз}} = 500$.

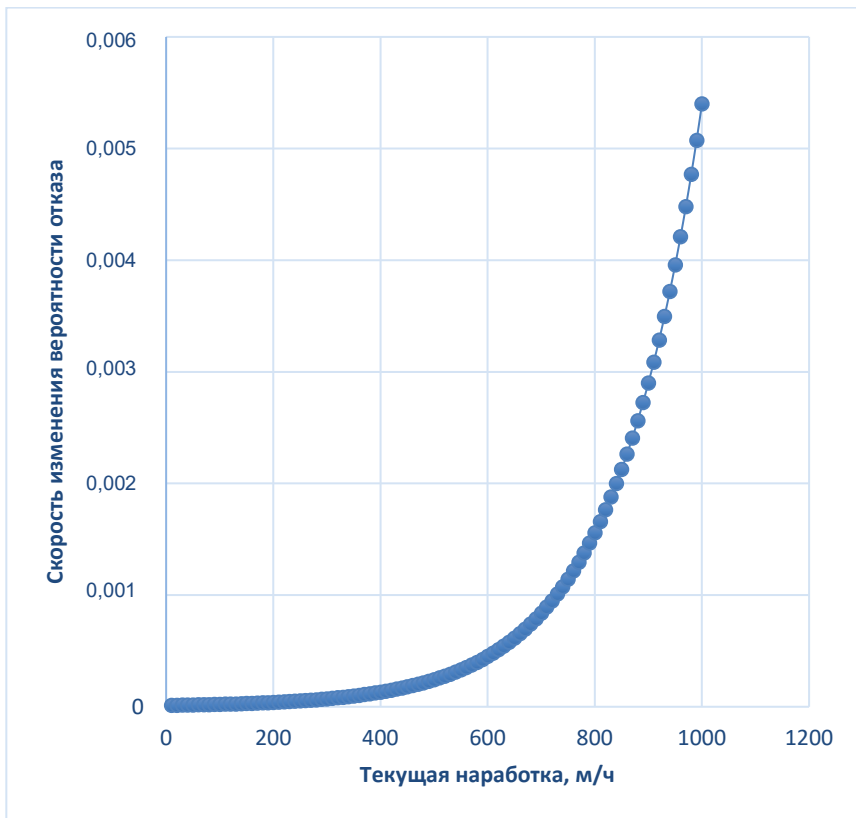


Рисунок 9 – График функции скорости изменения значения вероятности отказа агрегатов техники

Заметно, что после достижения значения назначенной наработки нарастающая вероятность отказа начинает увеличиваться стремительно быстрее. Данная кривая имеет схожий вид при изменяющемся значении $E_{\text{наз}}$. График поверхности в общем виде приведён на рисунке 10.

Скорость нарастания вероятности отказа приведена в относительных значениях и не соответствует точным измерениям вероятности отказа, так как на объёмных графиках такая особенность производных не отражается ввиду относительности измерения значений.

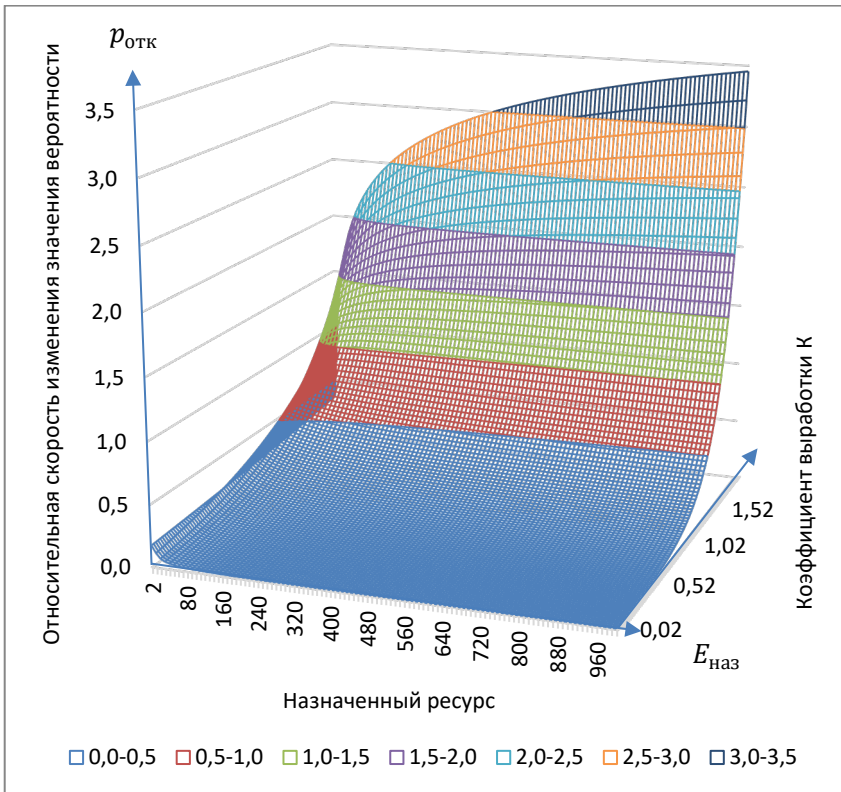


Рисунок 10 – График скорости нарастания вероятности отказа агрегатов техники

Наблюдается уменьшение скорости нарастания вероятности отказа при увеличении размерности измерения назначенного ресурса детали, что подтверждает теорию о лучшей работе модели при укрупнённой оценке полезной работы агрегатов.

Программное обеспечение разработанного приложения для осуществления имитационного моделирования в комплексной системе обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники в аэропортах

Перед описанием работы приложения установим требования к результатам его работы:

- ввод статистических данных о конкретных узлах и агрегатах специальной автомобильной техники;
- ввод данных о возможностях поставки запасных частей с возможностью последующей оценки и выбора наиболее оптимальных вариантов;

- полный вывод результатов моделирования с хранением записей о результатах каждого цикла и шага моделирования;
- графическая визуализация результатов моделирования.

Итоговое программное обеспечение представляет собой отдельный исполняемый файл. Интерфейс приложения приведён на рисунке 11.

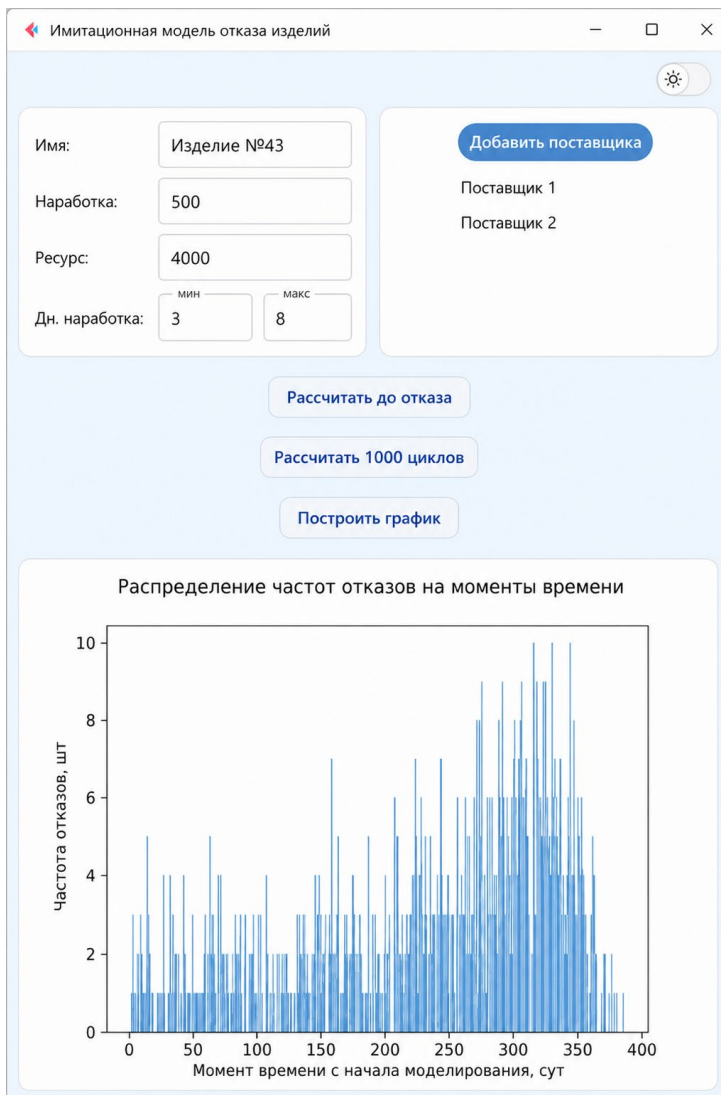


Рисунок 11 – Интерфейс примера возникновения отказов агрегата техники

В текущем исполнении программного обеспечения результаты сохраняются в текстовый файл *«result.txt»* в выбранной папке. Формат стандартного отчёта:

«1» – номер текущей итерации алгоритма (сутки итерации, где нулевой день, день ввода в эксплуатацию).

«Текущее состояние: 51.7798» – наработка на конец текущей итерации во введённых единицах измерения.

В данном примере на первый день имитации деталь была задействована в 51,7798 единицах работы, что незначительно выше максимальной заданной наработки, что показывает, что программа допускает превышения установленных рамок, но с малой вероятностью при имитации. При достижении отказа в строке отчёта выводится «ОТКАЗ» и указывается максимальный ресурс детали. В данном цикле моделирования изделие отказало на 340-е сутки работы при наработке 11717,1004 из максимального в 100 000. Такие результаты обосновываются высокой вероятностной составляющей моделирования. После последней строки итераций указывается отладочная информация о дате начала моделирования и прогнозируемой дате отказа. Также указывается, при каком значении вероятности отказа произошёл сбой в работе изделия. В данном примере отказ произошёл с вероятностью отказа в 0,0001, что показывает наихудший случай моделирования.

После указываются сведения о поставщиках, напротив наименования организации указывается атрибутивная информация о предприятиях, указанная во время ввода данных, и дата заказа запасной части для того, чтобы она была доставлена к моменту отказа, рассчитанному в итерациях моделирования. Из данного примера наблюдается недостоверность результатов при единичном цикле моделирования. Действительно, ввиду имитации вероятностных переменных могут быть получены результаты, далёкие от средних ожидаемых значений, однако посредством использования множества циклов имитации возможно решить данную задачу. При выборе опции «Рассчитать 1000 циклов» будет выведено такое же диалоговое окно с выбором папки сохранения результатов моделирования. В текущем исполнении ПО результаты расчёта 1000 циклов сохраняются в файл *«result1000.txt»* в выбранной папке. Формат отчёта аналогичный одному циклу, однако номер в левом столбце записывает номер цикла имитации, а в строке записывается состояние на момент отказа, «ОТКАЗ» и данные о количестве итераций внутри цикла.

Пример: первый цикл был закончен на 385-й день, деталь отработала 13159,4637 единиц выработки, тогда как второй – уже на 1045-й день с наработкой в 36714,5039. Максимальным оказался цикл №671 в 2032 дня с выработкой в 71304,5190 единицы, а минимальный цикл №199 длиной

в 1 день и выработкой 27,4202. Такие значения далеко отклонены от средних и компенсируют друг друга. Для заданного изделия по результатам моделирования оказалось, что ожидаемый срок службы при заданной производительности равен 702 суткам. Дата отказа 29.03.2027 при расчёте от 26.04.2025. Аналогично выводятся данные о дате заказа запасных частей по разным предприятиям на основе среднего значения продолжительности безотказной работы и с учётом срока поставки.

Оценка эффективности применения комплексной системы обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники в аэропортах

Рассмотрим весь цикл ремонта специальной автомобильной техники в связи с отказом узла одного из важных агрегатов. Для сравнения проведём анализ последовательности действий, количественного значения издержек в работе предприятия, связанных с организацией срочного ремонта, полного времени ожидания восстановления работоспособности транспортной единицы и других показателей в разных случаях вариантов действий при отказе.

Исходные данные для задачи:

- отказ случился на 10-й день с начала отслеживания техники;
- срок поставки запасной части 30 сут.;
- издержки от простоя техники 30 000 руб./сут.;
- издержки от простоя запасной части 4 000 руб./сут.;
- продолжительность ремонта 5 сут.;

Во время эксплуатации техники возникает потребность в замене частей силовой установки автокрана. После отказа техника отправляется на срочный ремонт. В тот же момент осуществляется закупка необходимых запасных частей. Ввиду характера ремонта потребные детали доставляются от специализированных поставщиков долгое время, на протяжении всего этого времени специальная автомобильная техника находится в неработоспособном состоянии, что приводит к затратам, связанным с неэффективным использованием автотранспорта. После прибытия необходимых запасных частей начинается ремонт техники. Спустя такое время специальная автомобильная техника снова находится в рабочем состоянии. Функция издержек принимает вид:

$$f(t) = \int_{t_0}^t R dt \quad (12)$$

где R – издержки за единицу времени простоя; t – общее время простоя.

Для данного случая есть два периода простоя: простой техники в ожидании запасных частей и простоя техники во время ремонта, тогда:

$$f(t) = R_{\text{ож}} \cdot t_{\text{ож}} + R_{\text{рем}} \cdot t_{\text{рем}} \quad (13)$$

где $R_{\text{ож}}$ – издержки за единицу времени простоя техники в ожидании поставки запасных частей;

$R_{\text{рем}}$ – издержки за единицу времени простоя техники во время ремонта;

$t_{\text{ож}}$ – время простоя в ожидании поставки запасных частей.

$t_{\text{рем}}$ – время простоя в ремонте.

Для данной задачи:

$$f(t) = 30\,000 \cdot 30 + 30\,000 \cdot 5 = 1\,050\,000 \text{ руб.}$$

График издержек приведён на рисунке 12.

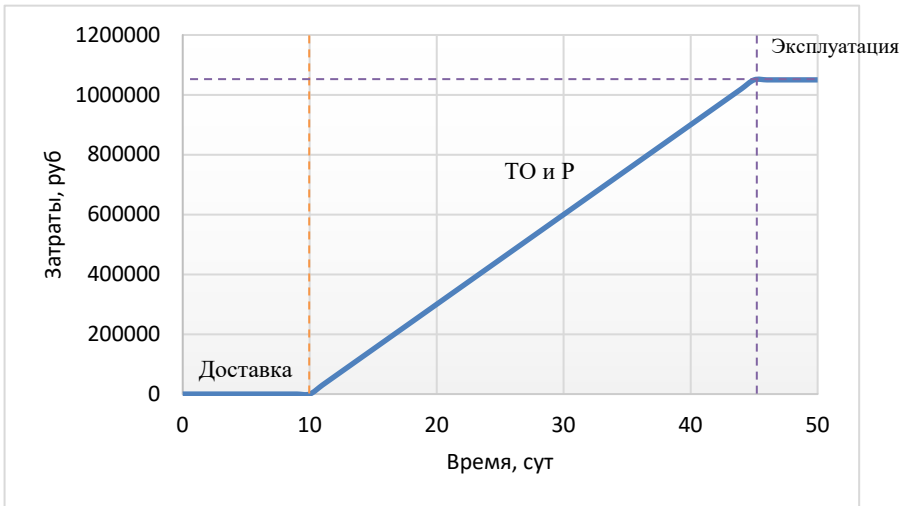


Рисунок 12 – График издержек при оперативном ремонте специальной автомобильной техники

Второй вариант предупреждения внезапных отказов – ведение базы потребных запасных частей. Все необходимые для ремонта запасные части находятся на хранении на предприятии. Потребная для данного ремонта деталь хранится на складе уже 2 месяца на момент начала отслеживания. Тогда

$$f(x) = R_{\text{ожЗП}} \cdot t_{\text{ожЗП}} + R_{\text{рем}} \cdot t_{\text{рем}} \quad (14)$$

где, $R_{\text{ожЗП}}$ – издержки за единицу времени простоя запасных частей на хранении в ожидании потребности в их применении;

$t_{\text{ожЗП}}$ – время простоя запасных частей на хранении в ожидании потребности в их применении.

В рамках обследования:

$$f(x) = 4000 \cdot 70 + 30\,000 \cdot 5 = 430\,000 \text{ руб.}$$

а график издержек принимает вид рисунка 13.

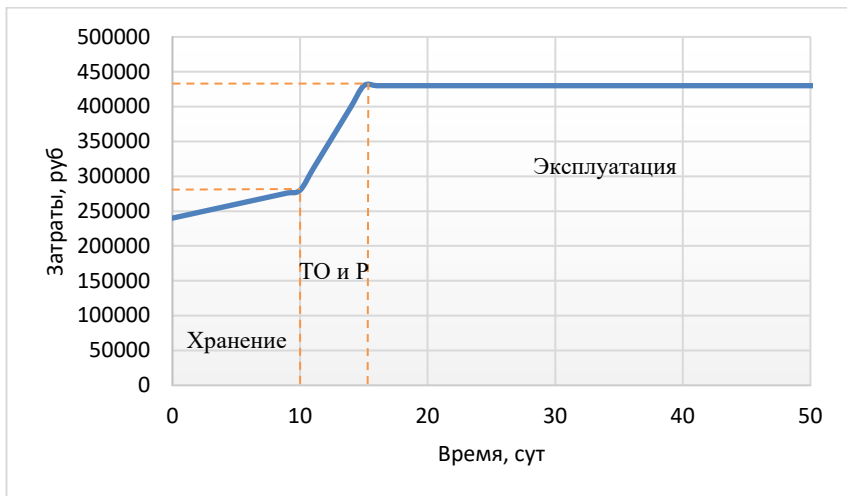


Рисунок 13 – График издержек при планово-предупредительном ремонте специальной автомобильной техники

При использовании моделирования зафиксировано, что средняя ошибка определения момента поломки варьируется в районе 10 суток. Это означает, что при использовании модели необходимая запасная часть может поступить на предприятие в промежутке времени от 10 суток до отказа до 10 суток после отказа. Рассмотрим все случаи определённого значения ошибки моделирования. Общий расчёт значения затрат выполняется по формуле (12). Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Издержки при разных ошибках моделирования

№ п/п	Ошибка моделирования, сут. с момента отказа	Итоговые издержки, руб.	Разница издержек, руб.	Разница издержек, %
1	–10	190 000	40 000	26,7
2	–9	186 000	36 000	24,03
3	3–8	182 000	32 000	21,36
4	–47	178 000	28 000	18,69
5	–65	174 000	24 000	16,02
6	–56	170 000	20 000	13,35
7	–47	166 000	16 000	10,68

Окончание таблицы 1

№ п/п	Ошибка моделирования, сут. с момента отказа	Итоговые издержки, руб.	Разница издержек, руб.	Разница издержек, %
8	–38	162 000	12 000	8,01
9	–29	158 000	8 000	5,34
10	–1	154 000	4 000	2,67
11	0	150 000	0	0
12	1	180 000	30 000	20
13	2	210 000	60 000	40
14	3	240 000	90 000	60
15	4	270 000	120 000	80
16	5	300 000	150 000	100
17	6	330 000	180 000	120
18	7	360 000	210 000	140
19	8	390 000	240 000	160
20	9	420 000	270 000	180
21	10	450 000	300 000	200

Эталонное значение, соответствующее прибытию запасной части в момент поломки, соответствует минимальным общим затратам и равно 150 000 руб.

Из расчётов в главе 3 известно, что вероятность верного прогноза равна 0,722, значит вероятность затрат менее 200 000 рублей соответствует 72% случаев применения тактики моделирования.

Только в 28% случаев итоговые затраты превысят данный порог, однако затраты при использовании других стратегий превышают это значение более чем в два раза.

В случае критической ошибки в использовании модели общие издержки превышают результаты других стратегий снабжения запасными частями.

График издержек при разных ошибках моделирования сроков поставки запасных частей представлен на рисунке 14.

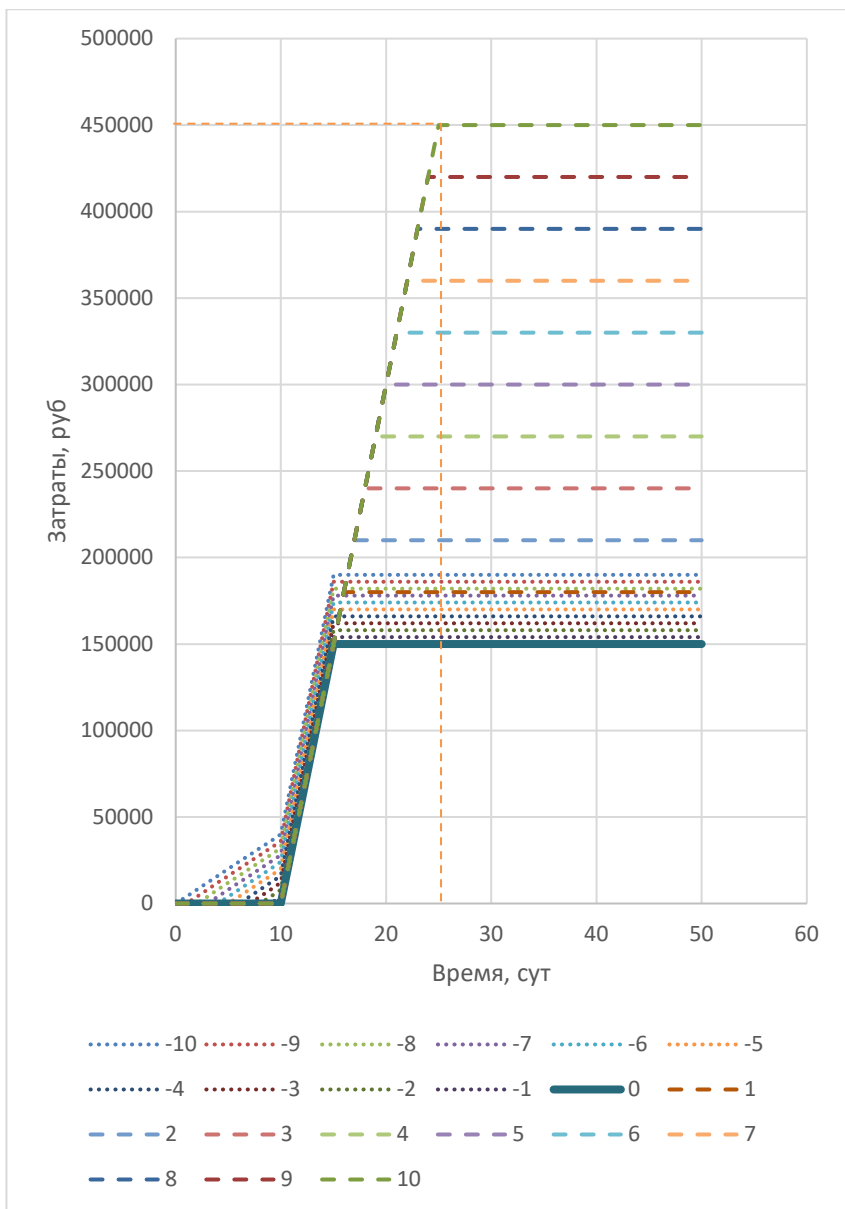


Рисунок 14 – График издержек при разных ошибках моделирования сроков поставки запасных частей

Данные расчёты верны для большинства случаев применения метода моделирования отказов, однако с 10% вероятностью реальные значения могут превышать показанные нормы. Это связано с некорректным применением моделирования, недостаточными или неверными исходными данными, неопределёнными обстоятельствами. Итоговое сравнение методов приведено на рисунке 15.

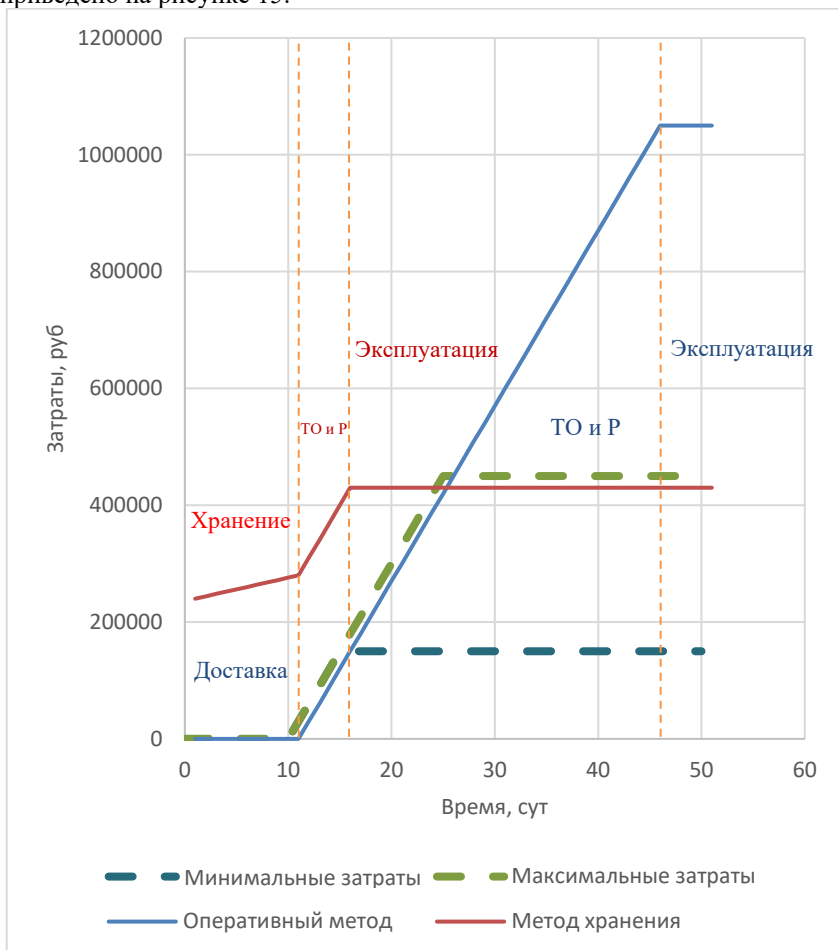


Рисунок 15. Сравнение затрат применения разных методов снабжения запасными частями

Таким образом, применение технологии моделирования в 90% случаев позволяет снизить общие затраты на снабжение запасными частями.

Как было описано в главе 4, использование моделирования позволяет отказаться от одной переменной в процессе принятия решения, а именно от срока поставки. Модель позволяет с 90% вероятностью ликвидировать большую часть издержек от простоя во время ремонта. Одна из основных составляющих во время выбора поставщиков запасных частей при срочном ремонте – скорость поставки. В момент непредвиденной поломки из-за издержек простоя предприятие зачастую может выбрать менее надежных поставщиков с менее качественными запасными частями ввиду более быстрой поставки деталей к ремонту. Менее качественные детали приводят к увеличению количества поломок, что приводит к более частой потребности в ремонте, что, в свою очередь, увеличивает затраты на ремонт и снижает эффективность использования автопарка.

Оценка конкретного экономического эффекта требует проведения детального анализа, учитывающего специфику деятельности предприятия, парк техники, условия эксплуатации и другие факторы. Внедрение моделирования технологического процесса наработки узлов и агрегатов специальной автомобильной техники для прогнозирования отказов и планирования ремонта является перспективным направлением повышения эффективности деятельности предприятий. Это позволяет снизить затраты на техническое обслуживание и ремонт, повысить надежность техники, улучшить планирование работ и обеспечить безопасность эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Квалификация работы. Выполненное исследование базируется на разработке модели прогнозирования отказов узлов и агрегатов специальной автомобильной техники для определения необходимого момента поставки запасных частей в рамках комплексной системы обеспечения запасными частями специальной техники в аэропортах. Данный подход позволил сформулировать научные основы комплексного обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники в аэропортах, включающие теоретические и прикладные разработки, которые в совокупности можно квалифицировать как новое научное достижение, направленное на решение проблемы простоев транспортных средств в связи с продолжительным ожиданием поставки запасных частей для своевременного ремонта узлов и агрегатов специальной автомобильной техники в аэропортах Московского авиационного узла.

Исследование можно характеризовать как имеющее важное хозяйственное значение для развития эксплуатации специальной автомобильной техники и экономики Российской Федерации.

Область исследования диссертации и выполненные автором оригинальные разработки по всем элементам ее научной новизны соответствуют

национальным приоритетам научно-технологического развития Российской Федерации и требованиям паспорта научной специальности 2.9.5 – «Эксплуатация автомобильного транспорта».

В результате выполненных теоретико-методологических исследований, предложенных математических моделей, проведённых экспериментальных исследований и организационных мероприятий сформированы научные основы комплексного обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники в аэропортах, использующие научную методологию и разработанные практические методы, обеспечивающие повышение эффективности функционирования системы снабжения запасными частями автопарков специальной автомобильной техники в аэропортах, а также получение оптимальных решений и сокращение издержек при простое автотранспорта в ожидании срочного ремонта с применением цифровых технологий.

Внедрение результатов исследования обеспечит большой вклад в повышение производительности специальной автомобильной техники в аэропортах и в конечном итоге в развитие экономики страны и повышение качества процессов транспортного обслуживания в Российской Федерации, что подтверждает народно-хозяйственную значимость полученных результатов.

Формирование комплексной системы обеспечения запасными частями специальной техники в аэропортах потребовало разработки системы взаимодействия технической и логистической служб аэропортов для координации принятия решений о необходимости поставки специализированных запасных частей.

Практическая реализация методологии приведена в виде программного обеспечения моделирования наработки узлов агрегатов специальной автомобильной техники для прогнозирования моментов времени потребности в запасных частях.

Основные научные и практические результаты диссертационного исследования состоят в следующем:

1. Определены основные характеристики и номенклатура существующего парка наземной техники аэропортов МАУ, установлено, что более 90% парка использует автомобильное шасси – это специальная автомобильная техника. Показано, что в структуре парка наземной техники аэропортов МАУ соотношение техники иностранного и отечественного производства составляет 85% к 15% соответственно.
2. Аналитически выявлена функция зависимости вероятности отказа от отношения текущей наработки к назначенному ресурсу изделий, построены общие графики для полученного распределения, учитывающие разные значения как ресурса, так и наработки, создан алгоритм определения рода

распределения с возможностью изменения функции при наличии статистических данных об отказах, что позволяет применять модель как в системах с функционирующими элементами разных уровней, так и в узкоспециализированных условиях работы одного типа элементов. На данной основе в диссертационном исследовании разработаны научные основы комплексного обеспечения специальной автомобильной техники аэропортов запасными частями.

3. На основе проведённого комплексного анализа вероятностной сущности отказов и работы системы снабжения запасными частями аэропортов сформирована модель вероятностного прогноза времени отказа и ресурса запасных частей с учётом статистического анализа работы аэропортов за последние несколько лет.

4. В рамках комплексной системы обеспечения запасными частями специальной техники в аэропортах разработана математическая модель прогнозирования отказов узлов и агрегатов данной техники. Создан алгоритм работы модели наработки узлов и изделий в зависимости от имеющихся статистических данных о предшествующей работе системы и аналогичных систем. При этом в рамках пробного моделирования доказана нормальность распределения дневной производительности специальной автомобильной техники в аэропортах. Сравнение результатов разработанного алгоритма с реальными значениями показало, что максимальная ошибка моделирования наработки не превышает 5%, что, в свою очередь, свидетельствует о работоспособности алгоритма и возможности его применения на практике. Доказано, что использование имитационного моделирования позволяет снизить вероятные расходы на 23,34%.

5. Разработаны и предложены показатели, необходимые для формирования специализированной базы данных запасных частей специальной автомобильной техники с целью дальнейшего её использования в имитационном моделировании прогноза необходимых сроков доставки запасных частей специальной автомобильной техники. Теоретически и экспериментально доказано, что после порога в 80% наблюдается значительное увеличение потока отказов элементов, связанное с приближением к выработке ресурса. При этом отказы в зоне от 20% до 80% не связаны с качеством самого изделия, а вызваны условиями эксплуатации.

6. Разработано программное обеспечение с графическим интерфейсом, имеющее возможности внесения статистических данных с конкретного предприятия в собственных условиях эксплуатации, внесения данных возможных поставщиков запасных частей на указанные агрегаты специальной автомобильной техники и вывода данных в виде отчётных форм и в графическом представлении в виде графика частот отказов на определённые сроки эксплуатации. Разработанное программное обеспечение ав-

томатизирует процесс определения оптимальных сроков снабжения запасными частями специальной автомобильной техники, обеспечивая минимизацию времени простоя парка. Экспериментально, с помощью инструментов имитационного моделирования, доказано изменение оптимальных результатов принятия решений при использовании моделирования с целью исключения критерия срока поставки из задачи принятия решения.

7. Разработанное программное обеспечение апробировано на статистических данных взаимодействия систем технического обслуживания, ремонта и обеспечения запасными частями в целях прогнозирования времени снабжения, технического обслуживания и ремонта специальной автомобильной техники аэропортов. Произведён расчёт прикладного использования разработанной модели наработки узлов и агрегатов специальной автомобильной техники для предупреждения отказов и планирования ремонта. При этом проведено сравнение разработанной методики с двумя иными стратегиями снабжения запасными частями аэропортов московского авиационного узла, показавшее, что при использовании моделирования с вероятностью в 0,722 общие расходы, связанные со срочным ремонтом после отказа узла или агрегата специальной автомобильной техники при использовании моделирования наработки намного ниже, чем при использовании текущих способов снабжения.

8. Разработаны требования к интеграции системы моделирования наработки узлов и агрегатов специальной автомобильной техники для предупреждения отказов и планирования ремонта. Доказано, что для оптимального использования разработанной методики необходимо создание общей базы номенклатуры используемых деталей и запасных частей с указанием статистических значений наработки до отказа, ресурса деталей, производительности агрегатов, характеристик поставщиков, качества приобретаемых деталей, управление ресурсами склада или интеграция алгоритма в уже существующие системы управления поставками, техническим состоянием автопарка специальной автомобильной техники.

9. Предложена стратегия применения разработанной комплексной методологии обеспечения специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах, основанная на определении экономической эффективности и использовании аналитических инструментов имитационного моделирования. Модельными расчётами доказано, что применение технологии моделирования в 90% случаев позволяет снизить общие затраты на снабжение запасными частями, а также позволяет с вероятностью 0,9 ликвидировать большую часть издержек от простоя во время ремонта.

10. Теоретически и экспериментально доказано, что внедрение комплексной системы организации поставок запасных частей для аэропортов с учётом минимизации расходов простоя специальной автомобильной техники на основе имитационного моделирования технологического процесса

наработки узлов и агрегатов техники для прогнозирования отказов и планирования ремонта является перспективным направлением повышения эффективности деятельности предприятий. Таким образом, на базе разработанных научных основ комплексного обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники в аэропортах решена важная народно-хозяйственная задача – снижение затрат на ремонт и ТО, повышение надежности техники, повышение качества планирования работ и обеспечение безопасности эксплуатации.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций

1. **Арифуллин, И.В.** Интегрированная логистическая поддержка поставок запасных частей для аэродромной наземной техники (на примере пожарных машин аэропортов Московского авиационного узла) / И.В. Арифуллин, В.В. Некрасов, А.А. Соловьева // Автотранспортное предприятие. – 2013. – № 7 (42). – С. 54–55.

2. **Арифуллин, И.В.** Новая модель проектного управления процессами жизненного цикла транспортно-логистической системы. / И.В. Арифуллин, А.Г. Некрасов, В.В. Некрасов // Транспорт: наука, техника, управление. – 2013. – № 7. – С. 26–28.

3. **Арифуллин, И.В.** Создание интегрированной транспортно-логистической системы Новой Москвы путем внедрения комплексных транспортных узлов / И.В. Арифуллин // Транспорт: наука, техника, управление. – 2013. – № 9. – С. 64–66.

4. **Арифуллин, И.В.** Применение систем повторного использования деталей и узлов подвижного состава / И.В. Арифуллин, В.В. Некрасов, А.А. Соловьева // Транспорт: наука, техника, управление. – 2013. – № 11. – С. 50–51.

5. **Арифуллин, И.В.** Система жизненного цикла запасных частей подвижного состава / И.В. Арифуллин, В.В. Некрасов, А.А. Соловьева, Е.С. Проненко // Транспорт: наука, техника, управление. – 2014. – № 1. – С. 56–58.

6. **Арифуллин, И.В.** Комплексная оценка качества доставки запасных частей для технического обслуживания автотранспортного парка / И.В. Арифуллин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2016. – № 2(45). – С.37–41.

7. **Арифуллин, И.В.** Оптимизация технического обслуживания автомобилей (на примере аэродромных машин) с использованием основ логистических принципов доставки запасных частей / И.В. Арифуллин // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – №3 (56). – С. 218 – 220.

8. **Арифуллин, И.В.** Методика организации поставок запасных частей для специальных автомобилей, эксплуатирующихся в аэропортах / И.В. Арифуллин // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – №3 (62). – С. 211 – 215.

9. **Арифуллин, И.В.** Аналитическое определение весовых коэффициентов при многокритериальной оценке эффективности автотранспортных средств /

И.В. Арифуллин, М.Ю. Карелина, А.В. Терентьев // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2018. – № 1(52). – С. 3–9.

10. **Арифуллин, И.В.** Метод оценки качества эксплуатации автотранспортных средств / И.В. Арифуллин, А.В. Терентьев, А.А. Аллакин // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2018. – № 11. – С. 58–61.

11. **Арифуллин, И.В.** Процесс функционирования транспортно-технологической системы при реализации логистических услуг в государственном секторе / И.В. Арифуллин, А.В. Терентьев, В.В. Некрасов // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2018. – № 3. – С. 32–35.

12. **Арифуллин, И.В.** Многокритериальная система управления на уровне региона обеспечением автомобильной техники аэропортов запасными частями / И.В. Арифуллин, А.В. Терентьев, // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2018. – № 5. – С. 46–49.

13. **Арифуллин, И.В.** Многокритериальная аналитическая модель определения срока эксплуатации автомобиля / И.В. Арифуллин, А.В. Терентьев, И.Н. Таланова // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2019. – № 4(59). – С. 3–8.

14. **Арифуллин, И.В.** Система управления качеством эксплуатации автомобиля / И.В. Арифуллин, М.Ю. Карелина, А.В. Терентьев // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2019. – № 2(57). – С. 34–42.

15. **Арифуллин, И.В.** Распределение провозных возможностей автотранспортного предприятия при оперативно-производственном планировании перевозок / И.В. Арифуллин, К.А. Кузнецов, Е.И. Ткачев, и др. // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2019. – № 5. – С. 65–69.

16. **Арифуллин, И.В.** Общая методика планирования многофакторного анализа при решении технологических задач авторемонтного производства / И.В. Арифуллин, А.В. Терентьев // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2019. – № 11. – С. 63–66.

17. **Арифуллин, И.В.** Сменно-суточное планирование грузовых автомобильных перевозок / И.В. Арифуллин, А.В. Терентьев, Е.И. Ткачев // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2019. – № 7. – С. 50–53.

18. **Арифуллин, И.В.** Анализ факторов влияния внешней среды на сроки эксплуатации автомобилей / И.В. Арифуллин, А.В. Терентьев // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2019. – № 1. – С. 47–50.

19. **Арифуллин, И.В.** Дискретная форма представления показателей технической эксплуатации автомобилей / И.В. Арифуллин, А.В. Терентьев, Т.Н. Егунова // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2020. – № 1 (60). – С. 10–15.

20. **Арифуллин, И.В.** Применение технико-экономического критерия для определения показателя пробега эффективной эксплуатации автомобилей / И.В. Арифуллин, А.В. Терентьев, Т.Н. Егунова // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2020. – № 3. – С. 70–74.

21. **Арифуллин, И.В.** Методология формирования региональной системы транспортной мобильности поколения на основе универсальных цифровых сервисов / И.В. Арифуллин, С.Л. Горелик, И.А. Иванов и др. // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2020. – № 7. – С. 44–49.

22. **Арифуллин, И.В.** Математические модели принятия решений в интеллектуальных транспортных системах / И.В. Арифуллин, В.Д. Егоров, А.Ю. Андреев и др. // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2021. – № 1 (64). – С. 106–113.

23. **Арифуллин, И.В.** Математические модели управления транспортными потоками в интеллектуальных транспортных системах / И.В. Арифуллин, В.Д. Егоров, А.Ю. Андреев и др. // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2021. – № 1. – С. 46–50.

24. **Арифуллин, И.В.** Информационно-аналитическая платформа организации грузовых перевозок дорожно-транспортной системы мегаполиса / И.В. Арифуллин, А.В. Терентьев, Я.Е. Пирогов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2022. – № 4 (71). – С. 42–48.

25. **Арифуллин, И.В.** Синтез оптимальной программы управления качеством принимаемых решений в интеллектуальных системах организаций автомобильных перевозок / И.В. Арифуллин, А.В. Терентьев, А.А. Носков // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2023. – № 4 (75). – С. 107–116.

26. **Арифуллин, И.В.** Математическая модель управления качеством принимаемых решений в сложных системах грузовых автомобильных перевозок / И.В. Арифуллин, А.В. Терентьев, А.А. Носков // Вестник гражданских инженеров. – 2023. – № 6 (101). – С. 110–116.

27. **Арифуллин, И.В.** Метод оценки вкладов отдельных структур в эффективность системы грузовых автомобильных перевозок / И.В. Арифуллин, А.В. Терентьев, А.А. Носков // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2024. – № 9. – С. 79–87.

28. **Арифуллин, И.В.** Структура методов, применяемых для снятия неопределенности в информационных ситуациях, характерных для грузовых автомобильных перевозок / И.В. Арифуллин, О.В. Малихина // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2025. – № 1 (80). – С. 81–92.

29. **Арифуллин, И.В.** Комплексная ИТС технического обслуживания и обеспечения материально-технического снабжения специальных автомобилей, эксплуатируемых в аэропортах / И.В. Арифуллин // Мир транспорта и технологических машин – 2025. – № 1–4 (88). – С. 31–36.

30. **Арифуллин, И.В.** Метод оценки эффективности автотранспортных предприятий, осуществляющих контейнерные автомобильные перевозки / И.В. Арифуллин, С.С. Евтюков, А.А. Носков // Транспортное дело России – 2025. – № 2. – С. 273–277.

31. **Арифуллин, И.В.** Методология оценки системной эффективности грузовых контейнерных автомобильных перевозок / И.В. Арифуллин, С.А. Евтюков, А.А. Носков // Транспортное дело России – 2025. – № 4. – С. 110–113.

32. **Арифуллин, И.В.** Анализ природы факторов взаимодействия объекта с внешней средой в сложных транспортных системах грузовых автомобильных перевозок / И.В. Арифуллин, О.В. Малихина // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник – 2025. – №3 – С. 29–33.

33. **Арифуллин, И.В.** Методология классификации управления запасными частями, сочетающая подходы к обслуживанию и логистике / И.В. Арифуллин, С.А. Евтюков, О.С. Гуськова // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2026.– № 2 (85). – С. 91–99.

Научные публикации в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science

34. **Arifullin I.V.** Conceptual approach to improving road safety by improving reliability of equipment / Arifullin I.V. // В сборнике: Transportation Research Procedia, 2017. С.211-215.

35. **Arifullin I.V.** Application of methods for obtaining pareto set for increasing effectiveness of managing decisions under conditions of multi-criteriality / Arifullin I.V., Karelina M.Y., Benevolenskiy S.B, etc. // Smart Innovation, Systems and Technologies, 2020. Т.172. С.883-890.

36. **Arifullin I.V.** Efficiency ratio assessment model for buses / Arifullin I., Taysayev K., Evtukov S., etc. // В сборнике: Transportation Research Procedia. 14. Сеп. «14th International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities, OTS 2020», 2020. С.674-680.

37. **Arifullin I.V.** Methodological approach to digitalization of management processes in automobile and road complex / Arifullin I.V., Karelina M.Y., Pavlovskaya A.A., etc. // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol, 2020. С.012069.

38. **Arifullin I.V.** Organizing supplies of components and spare parts for specialized vehicles used at the airports of the arctic region / Arifullin I., Malikhina O., Nazarova A., etc. // В сборнике: Transportation Research Procedia., 2021. С.33-40.

Монографии

39. **Арифуллин, И.В.** Организация поставок запасных частей для специальных автомобилей, эксплуатируемых в аэропортах / Москва. Типография «Продвижение», 2025. – 167 с.

Научные публикации в изданиях, индексируемых в РИНЦ

40. **Арифуллин, И.В.** Комплексная система обеспечения запасными частями специальной техники в аэропортах / И.В. Арифуллин // В сборнике: Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах. Материалы XVI Международной конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Кравченко Павла Александровича. Санкт-Петербург, 2025. – С. 129-135.

Учебные пособия

41. **Арифуллин, И.В.** Поддержание эксплуатационных характеристик автомобилей. Методики расчёта производственной программы по текущему обслуживанию и текущему ремонту автомобилей / И.В. Арифуллин, Беляев А.И., Евтюков С.А. и др. // Учебное пособие. СПбГАСУ. – СПб.: ИД «Петрополис», 2019. – 32 с.

42. **Арифуллин, И.В.** Эффективность эксплуатации автомобиля. Методика анализа коэффициента технического использования в целях определения эффективного пробега эксплуатации / И.В. Арифуллин, Беляев А.И., Евтюков С.А. и др. // Учебное пособие. СПбГАСУ. – СПб.: ИД «Петрополис», 2019. – 30 с.

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 11.09.2026. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 2,3. Тираж 150 экз. Заказ 89.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А