

На правах рукописи

АРИФУЛЛИН ИЛЬЯ ВЛАДИМИРОВИЧ

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ КОМПЛЕКСНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЗАПАСНЫМИ ЧАСТЯМИ СПЕЦИАЛЬНОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ
ТЕХНИКИ В АЭРОПОРТАХ

Специальность: 2.9.5 – Эксплуатация автомобильного транспорта

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант: д.т.н., проф. Евтюков С.А.

Санкт-Петербург – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СОСТАВ АВТОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ АЭРОПОРТОВ МОСКОВСКОГО АВИАЦИОННОГО УЗЛА	14
1.1 Оценка текущего спроса и предложения на авиационные пассажирские перевозки	14
1.2 Оснащение аэропортов специальной автомобильной техникой для содержания аэродромов и обслуживания воздушных судов и пассажиров	19
1.3 Вероятностная составляющая возможности появления необходимости в запасных частях для специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах.	35
1.4 Определение момента возникновения потребности в запасных частях для специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах.	49
Выводы по первой главе.....	61
2 ТРЕБОВАНИЯ К КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЕ СНАБЖЕНИЯ АЭРОПОРТОВ ЗАПАСНЫМИ ЧАСТЯМИ	63
2.1 Оценка жизненного цикла детали агрегатов специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах	63
2.2 Концепция логистического снабжения «точно в срок» для потока замен запасных частей специальной автомобильной техники аэропортов.....	71
2.3 Имитационное моделирование как средство прогнозирования моментов времени потребности в запасных частях для логистической концепции «точно в срок» для снабжения специальной автомобильной техники аэропортов.....	80
Выводы по второй главе	88
3 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МОМЕНТОВ ВРЕМЕНИ ПОТРЕБНОСТИ В ЗАПАСНЫХ ЧАСТЯХ.....	90
3.1 Требования к имитационной модели прогнозирования отказа узлов специальной автомобильной техники аэропортов.....	90
3.2 Анализ зависимости вероятности отказа агрегата от отношения текущей наработки к назначенному ресурсу.....	96
3.3 Алгоритм имитационного моделирования наработки узлов агрегатов специальной автомобильной техники аэропортов.....	107

3.4 Имитация отказов в зависимости от имитируемого значения текущей наработки	121
3.5 Система определения моментов необходимости заказа и прибытия запасных частей	129
Выводы по третьей главе.....	142
4 РАЗРАБОТКА ПРИКЛАДНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО ИМИТАЦИОННОГО АППАРАТА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАРАБОТКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ	145
4.1 Выбор вида программного обеспечения для имитационного моделирования.	145
4.2 Описание разработанного приложения для осуществления имитационного моделирования.	150
4.3 Практическая польза метода при выборе поставщиков.....	166
Выводы по четвёртой главе.....	169
5 ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗА УЗЛОВ СПЕЦИАЛЬНОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ АЭРОПОРТОВ	171
5.1 Расчёт экономической эффективности применения метода моделирования отказов.....	171
5.2 Прикладное использование моделирования наработки узлов и агрегатов специальной автомобильной техники аэропортов для предупреждения отказов и планирования ремонта	176
5.3 Стратегия внедрения имитационного моделирования прогнозирования моментов времени потребности в запасных частях	183
5.4 Процесс работы комплексной системы обеспечения запасными частями специальной техники в аэропортах.....	187
Выводы по пятой главе.....	235
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	237
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	242
ПРИЛОЖЕНИЯ	259
Приложение А	259
Приложение Б.....	268
Приложение В (Акты внедрения)	305

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ИНДЕНТИФИКАТОРОВ

ЛТ – «Just in Time», логистическая концепция «точно в срок»

МТТФ – Mean Time To Failure, среднее время до отказа

АСУ – автоматизированная система управления

АТП – автотранспортное предприятие

ВПП – взлётно-посадочная полоса

ВС – воздушное судно

ЕЦП – единый центр поставок

ИЛП – интегрированная логистическая поддержка

ИЛЦ – интегрированный логистический центр

ИТЛС – интегрированная транспортно-логистическая система

ИТС – интеллектуальная транспортная система

МАУ – Московский авиационный узел

САТА – специальная автомобильная техника аэропортов

СМО – система массового обслуживания

СУОПЗ – система управления обеспечением поставок запасных частей

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования.

Эффективная деятельность аэропортов Российской Федерации связана с выполнением множества технологических операций, в том числе технического обслуживания специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах. Одним из главных критериев производственной цепи, определяющим экономическую эффективность деятельности аэропорта, коэффициент готовности парка техники, безопасность авиационных перевозок является качественное 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 [90]. 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 [206,207].

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:

1) *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 [206]. Данная проблема усугубляется современными условиями геополитической нестабильности, приводящей к ограничениям в доступности запасных частей ряда иностранных производителей.

2) *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.

3) *Интенсивная эксплуатация специальной автомобильной техники, имеющей значительные возрастные характеристики.* Данный фактор приводит, зачастую, к нарушению действующих регламентов и является дестабилизирующим фактором в системе технического обслуживания и ремонта [206].

Перечисленные аспекты проблемы обеспечения 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 авиационных перевозок [206].

В настоящее время большинство технических служб аэропортов работают по системе «закупка по необходимости», или заказ на транспортировку и доставку необходимых для продолжения работы запасных частей и сырья производится в момент или при приближении момента конца 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 в силу перечисленных аспектов проблемы, а также ввиду географического нахождения производителей требуемых узлов и агрегатов прогнозирование оптимального времени доставки запасных частей становится невозможной. Для минимизации времени простоя специальной автомобильной техники в техническом обслуживании и ремонте предприятия стараются запасаться 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 [206].

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 элементов, ресурсоёмкость мероприятий по их установке, расчётные расходы на содержание, доставку, простои единиц эксплуатируемой техники, вероятную прибыль от инвестирования отложенных расходов и потери при неспрогнозированном отказе и т.д.

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 парков

специальной автомобильной техники, эксплуатируемых в аэропортах, необходимыми деталями. Такая система позволит обеспечить комплексное взаимодействие между подсистемой технического обслуживания и ремонта, специализированными техническими службами аэропортов и подсистемой организации перевозок и логистики [206].

Степень разработанности темы исследования. Значительный научный вклад по сформулированной теме исследования внесли такие авторы, как: Л.Л. Афанасьев, И.И. Батищев, В.М. Беляев, Л.А. Бронштейн, В.Д. Волков, В.В. Донченко, В.В. Дыбская, А.В. Комаров, В.А. Корчагин, В.С. 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 интегрированной 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 [206].

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: техническое обслуживание 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, имитационного 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.

1 СОСТАВ АВТОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ АЭРОПОРТОВ МОСКОВСКОГО АВИАЦИОННОГО УЗЛА

1.1 Оценка текущего спроса и предложения на авиационные пассажирские перевозки

Экономика взаимосвязана с транспортом и связанными с ним услугами. Воздушный транспорт остается наиболее востребованным и незаменимым в некоторых отраслях. Спрос на авиаперевозки всегда был высоким, и в настоящее время его рост происходит с беспрецедентной скоростью. Воздушный транспорт обеспечивает наиболее высокую скорость сообщения и доставки товаров, что является лимитирующим фактором для некоторых видов скоропортящихся грузов и особенно важно для пассажиров.

Несмотря на наложенные ограничения на отрасли Российской Федерации, воздушный транспорт продолжает развиваться и увеличивать пассажиропоток как на международном, так и на внутреннем сообщениях. Динамика изменения спроса на услуги аэропортов отслеживается показателями пассажиропотока аэропортов за последние 12 лет. Данные об объёме перевозок по аэропортам МАУ приведены в таблице 1.1 и рисунках 1.1...1.4.

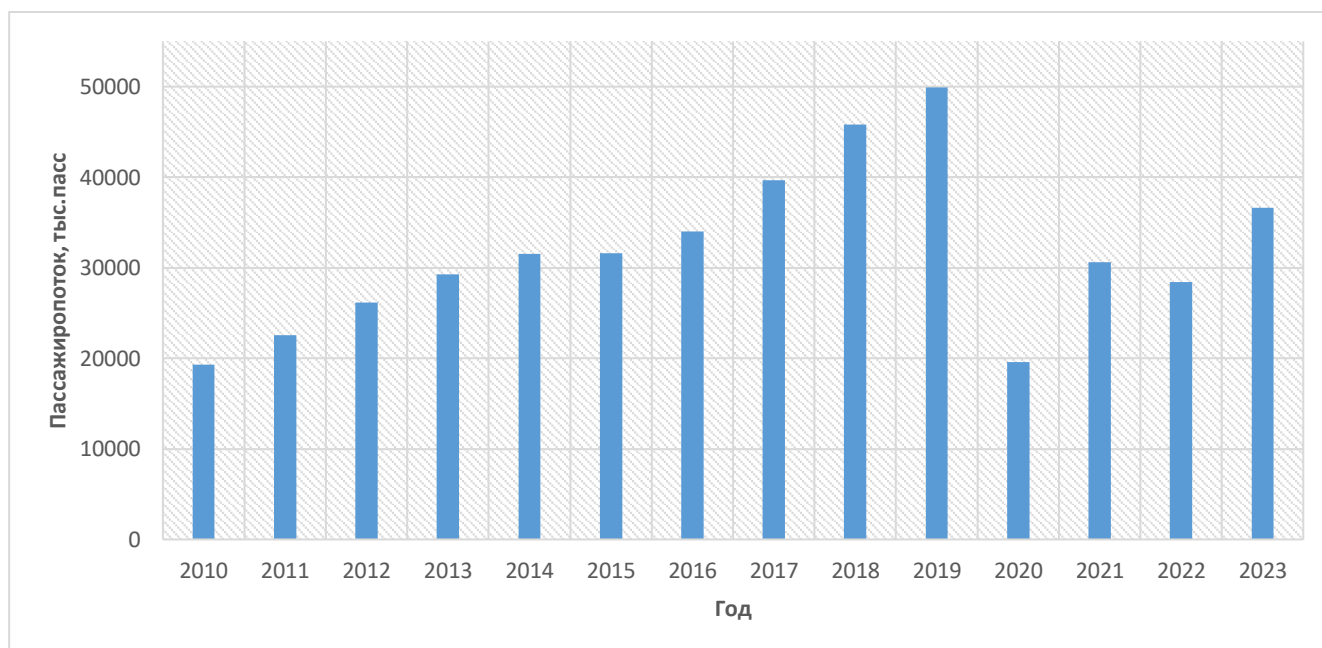


Рисунок 1.1 – Динамика пассажиропотока Шереметьево 2010 – 2023 гг.

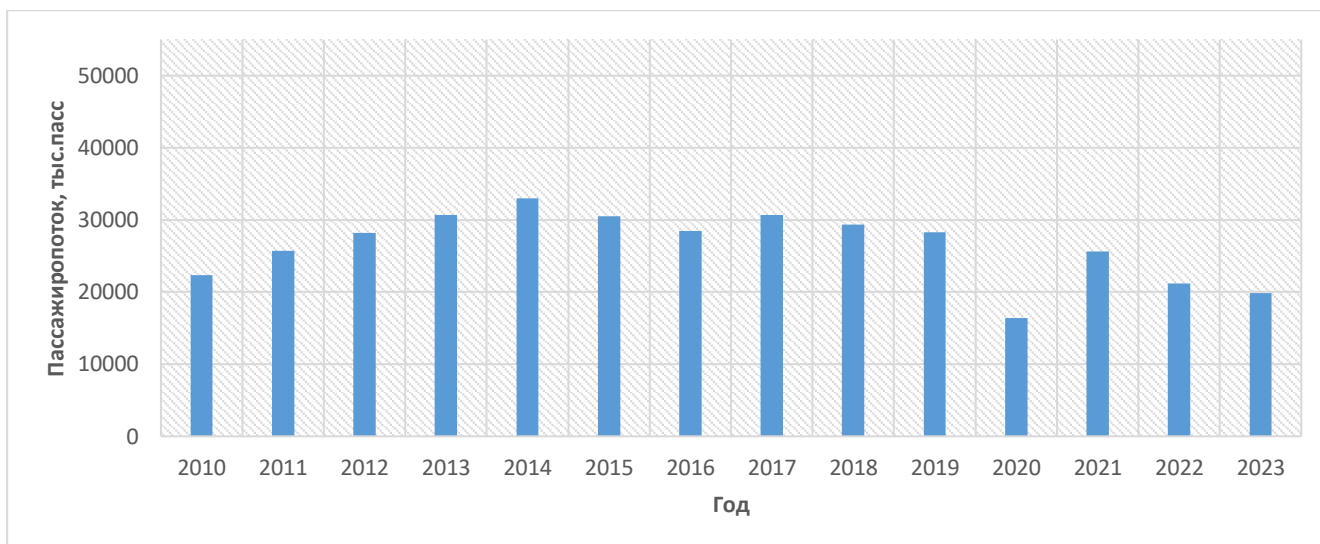


Рисунок 1.2 – Динамика пассажиропотока Домодедово 2010 – 2023 гг.

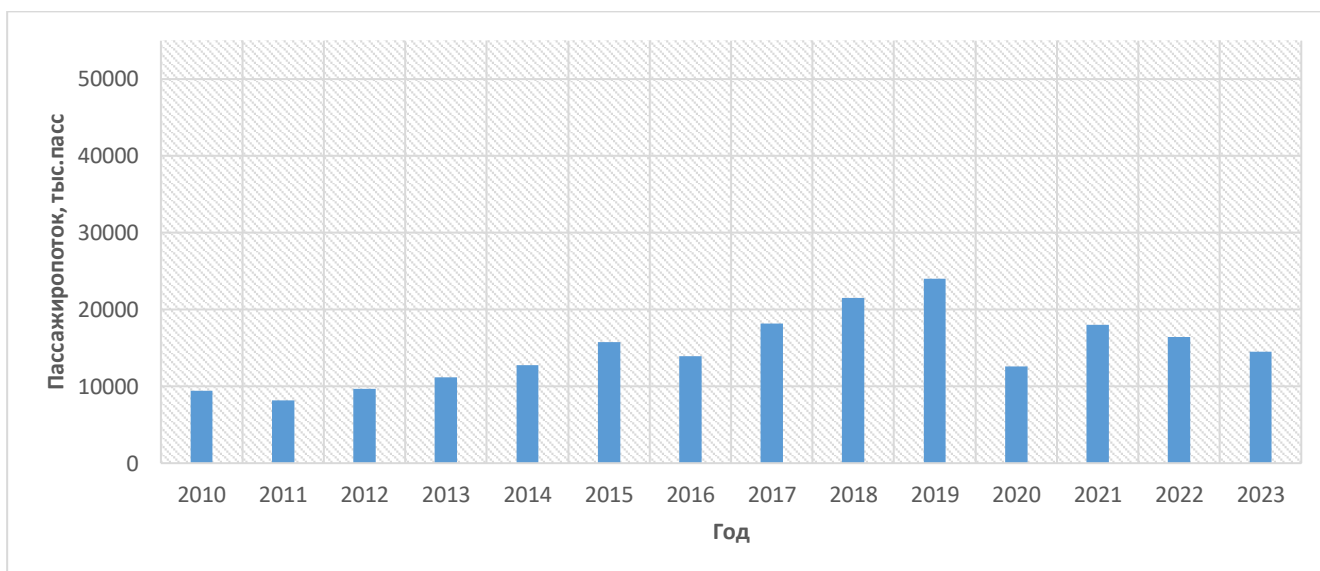


Рисунок 1.3 – Динамика пассажиропотока Внуково 2010 – 2023 гг.

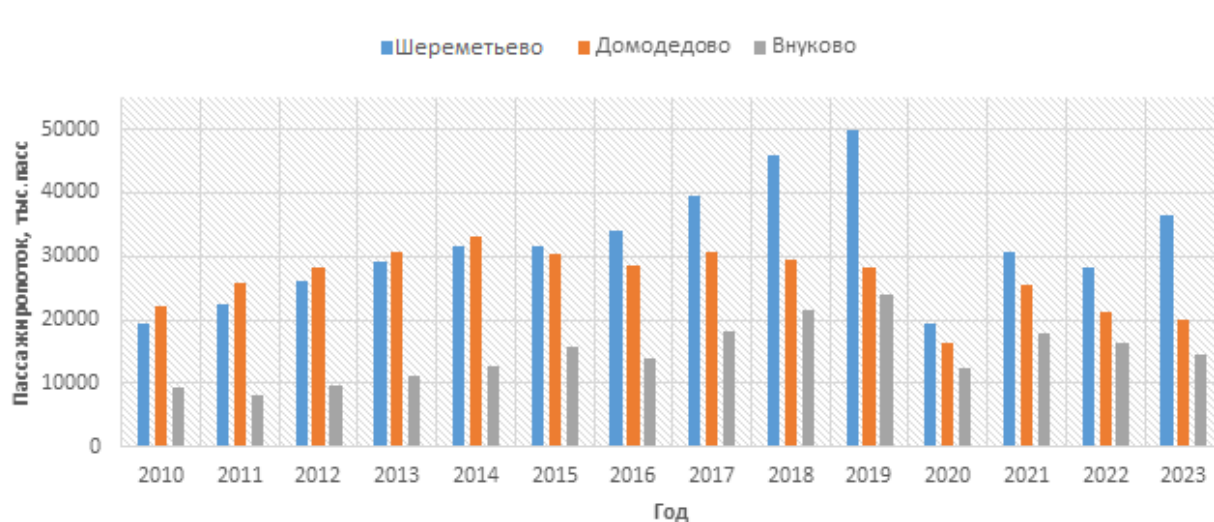


Рисунок 1.4 – Динамика пассажиропотока МАУ 2010 – 2023 гг.

Таблица 1.1 – Данные о пассажиропотоке аэропортов Московского авиационного узла 2010 – 2023 гг. млн. пасс.

Аэропорт	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
SVO	19,3	22,6	26,2	29,3	31,6	31,6	34,0	39,6	45,8	49,9	19,6	30,6	28,4	36,6
DME	22,3	25,7	28,2	30,7	33,0	30,5	28,5	30,7	29,4	28,3	16,4	25,6	21,2	19,9
VKO	9,5	8,2	9,7	11,2	12,7	15,8	13,9	18,1	21,5	24,0	12,6	18,0	16,4	14,5
Всего	19,3	22,6	26,2	29,3	31,6	31,6	34,0	39,6	45,8	49,9	19,6	30,6	28,4	36,6

Источник: составлено автором на основе результатов ранее выполненного исследования [206] с актуализацией данных за 2017–2023 гг.

Стоит отметить, что ни один из действующих аэропортов МАУ не входит в состав крупнейших авиапредприятий мира по основным общепринятым критериям, но все 3 основных и рассматриваемых в работе аэропорта являются крупнейшими аэропортами Европы.

В настоящее время модернизация трех аэропортов МАУ приобретает особое значение. В связи с этим распределение пассажиропотоков между аэропортами МАУ становится сложной задачей. Вопреки падению спроса на услуги авиаперевозок в 2020 году пассажиропоток возвращается к прежним значениям.

Прогнозирование объемов перевозок в аэропортах одного авиаузла требует специфического подхода. Ключевым моментом является необходимость рассматривать аэропорты не как независимые объекты, а как единый конгломерат, где идет конкуренция между его частями, называемый Московским авиационным узлом. Конкретным пассажирам не всегда важен аэропорт, из которого отбывает необходимы рейс, транспортная инфраструктура Москвы обеспечивает комфортный и удобный доступ ко всем трём лидирующим предприятиям. Это определяет методы и технологии прогнозирования их развития. Также важно применять дополнительные методы, которые помогут выявить конкурентные преимущества каждого аэропорта в рыночной среде [206].

По прогнозам Росавиации данные о будущем пассажиропотоке аэропортов МАУ приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Анализ и прогноз пассажиропотока по аэропортам МАУ по заключению Росавиации млн. чел.

Год	Внуково	Домодедово	Шереметьево	Итого
2010	8,8	22,3	18,5	49,6
2015	13,1	33,3	27,6	74,0
2020	17,4	44,3	36,7	98,5
2025	20,7	52,6	43,6	116,9
2030	23,4	59,6	49,4	132,4

В условиях снижения объёма авиационных перевозок в 2020 году анализ и прогноз пассажиропотока приведён в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Собственный анализ и прогноз пассажиропотока по аэропортам МАУ
млн. чел.

Год	Внуково	Домодедово	Шереметьево	Итого
2020	12,6	16,4	19,6	48,5
2021	18,0	25,6	30,6	74,2
2022	16,4	21,2	28,4	66,0
2023	14,5	19,9	36,6	71,0
2024	16,1	24,3	44,8	85,2
2025	17,7	28,7	53,0	99,4
2030	22,5	41,9	77,6	142,0
2035	36,9	81,5	151,4	269,8

Источник: расчёты автора с развитием подхода, разработанного ранее [206].

Имея данные прогноза пассажиропотока, возможно произвести оценку реальных возможностей аэропортов, учитывая их пропускную способность при полном задействовании всех возможностей взлётно-посадочных полос и пассажирских терминалов.

В 2023 году в аэропорту Домодедово введён в эксплуатацию новый сегмент пассажирского терминала – Т2, который увеличил площадь воздушной гавани почти до 500 тыс. м². Совокупная пропускная способность выросла до 60 млн пассажиров в год и 3100 вылетающих пассажиров в час.

Пассажирские терминалы аэропорта Шереметьево обеспечивают пропускную способность 80 млн пассажиров в год совокупно по всем 5 терминалам.

В 2023 году Внуково стал первым и единственным аэропортом в России, который связан со столицей метрополитеном. Аэровокзальный комплекс Внуково общей площадью около 300 тыс. кв. м способен обеспечить пропускную способность до 35 млн пассажиров в год.

Совокупная пропускная способность МАУ – 175 млн пассажиров в год.

Текущее состояние аэропортовых комплексов позволят удовлетворить спрос на авиационные перевозки вплоть до 2030 года. Диаграмма оценки удовлетворённости пропускной способности приведена на рисунке 1.5.

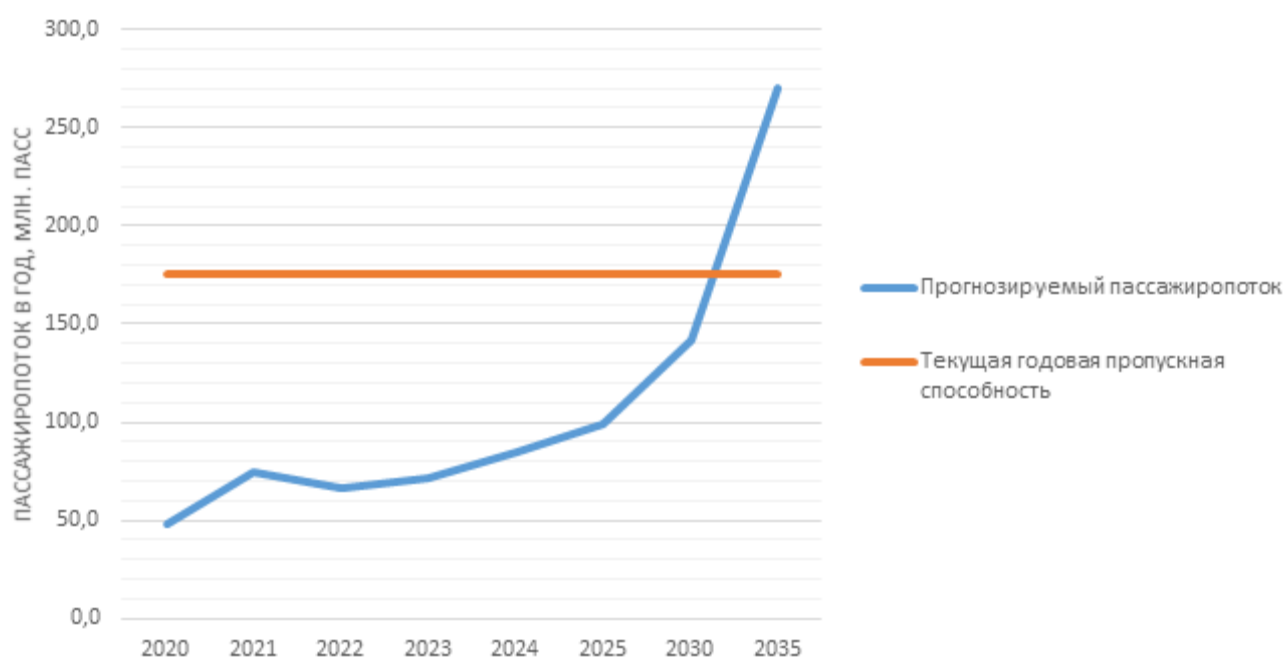


Рисунок 1.5 – Оценка пропускной способности аэропортов МАУ

За последние 5 лет аэропорты значительно расширили свои возможности введением новых терминалов и ВПП. В соответствии с оценками прошлых лет МАУ не соответствовал требованиям и в течение этого срока были реконструированы ВПП и терминалы в Шереметьево, Внуково и Домодедово.

1.2 Оснащение аэропортов специальной автомобильной техникой для содержания аэродромов и обслуживания воздушных судов и пассажиров

Для эффективной работы аэропорта, обеспечения готовности самолетов к вылету и поддержания взлетно-посадочных полос в надлежащем состоянии необходим парк наземной техники — специальной автомобильной техники, которая является важной частью функционирования всего авиационного предприятия.

Ключевой задачей в обеспечении надежности работы специальной автомобильной техники является управление поставками агрегатов, запасных частей и расходных материалов. Эта задача требует постоянной логистической поддержки и централизованной организации поставок запасных частей для всего парка с полным ассортиментом деталей. В настоящее время существует множество альтернативных транспортно-технологических систем, которые учитывают оценку жизненного цикла специальной автомобильной техники.

В международных аэропортах МАУ специальная автомобильная техника выполняет следующие функции:

1. Техническое обслуживание самолетов.
2. Поддержание аэродромов.
3. Коммерческое обслуживание самолетов.
4. Специальное обслуживание.

Каждое из этих направлений играет важную роль в обеспечении безопасной и бесперебойной работы аэропорта. Поэтому качественное и своевременное обслуживание (техническое обслуживание, текущий и капитальный ремонт) специальной автомобильной техники является критически важной задачей для поддержания работоспособности МАУ.

В статье «Интегрированная логистическая поддержка поставок запасных частей для аэродромной наземной техники на примере пожарных машин аэропортов Московского авиационного узла» [12] анализируются вопросы транспортного обновления аэропортов московского авиационного узла на примере

пожарной техники, а также рассматриваются требования государственных и международных стандартов. Описаны ключевые поставщики на российском рынке и представлена схема оптимальной реализации логистических процессов.

Интегрированный логистический центр (ИЛЦ) должен охватывать все услуги по взаимодействию с поставщиками для обеспечения аэропортовых служб, полностью отражая интересы аэропорта на данном рынке. Он должен выполнять функции представителей и координаторов всех процедур, предотвращая случаи незапланированных простоев [12].

Внедрение схемы управления потоками поставок позволит оптимизировать управление аэропортом, исключить службы планирования и собственную техническую базу, снизить переменные затраты на обслуживание техники, унифицировать автопарк и внедрить систему аутсорсинга в соответствии с международными стандартами ИСО серии 9000 [12].

В соответствии с рекомендуемыми нормами оснащённости аэропортов специальной автомобильной техникой расчётные значения принимаются согласно таблицам 1.4...1.10.

Таблица 1.4 – Требуемая оснащённость специальной автомобильной техники аэропортов для обслуживания пассажиров и обработки багажа

Наименование спецмашины	Количество САТА в зависимости от объемов пассажироперевозок, тыс. пасс./год						
	10–7	7–4	4–2	2–0,5	0,5–0,3	0,3–0,1	<0,1
1. Автобус пассажирский, перронный	9–7	8–5	4–3	2–1	1	1	1
2. Микроавтобус	5–4	4–3	4–3	4–2	2	1	1
3. Обслуживание пассажиров инвалидов	2–3	1–2	1	–	–	–	–
4. Трап пассажирский, самоходный	22–29	16–24	17–25	8–22	5–12	2–4	1–2
5. Автомобиль с подъемным кузовом	9–11	7–10	7–10	3–9	2–5	1–2	–
6. Автотранспортер	7–9	5–7	5–7	3–6	2–4	1	–
7. Автомобиль с подъемной платформой	9–11	7–10	5–7	3–5	2–5	1–2	–

8. Самоходный погрузчик контейнеров	5–6	3–5	2–3	2	–	–	–
9. Автолифт	5–7	4–6	4–6	2–5	1–3	1	–

Также необходимо провести анализ сравнения применения импортной специальной автомобильной техники и отечественного производства в аэропортах МАУ. Можно отметить, что в исследуемых аэропортах статистика данных соотношений примерно идентична. В среднем количество техники отечественного производства в парках составляет 15% от общего числа подвижного состава.

Таблица 1.5 – Требуемая оснащённость САТА для технического обслуживания авиационной техники

Наименование спецмашины	Количество САТА в зависимости от объемов пассажироперевозок, тыс. пасс./год						
	10–7	7–4	4–2	2–0,5	0,5–0,3	0,3–0,1	<0,1
1. Водозаправщик	5–4	4–3	4–3	3–2	2–1	1	1
2. Аэродромная кислородозарядная станция	3–2	2–1	2–1	2–1	1	1	1
3. Унифицированная газозарядная станция	2–1	2–1	1	–	–	–	–
4. Маслозаправщик	2	2	2	2–1	1	1	1
5. Передвижные электроагрегаты	8	7	7	6	4	1	1
6. Машина для обработки санузлов	4–6	3–5	3–5	2–4	1–2	–	–
7. Подогреватели воздуха	6–8	5–7	5–7	3–6	1–3	–	–
8. Аэродромные буксировщики самолетов	12	11	9	5	2	–	–
9. Самоходная площадка обслуживания высоких частей самолета	4	4	4	3	2	–	–

10. Установка воздушного запуска авиадвигателей	3	3	3	2	1	—	—
11. Машина для комплексной уборки салонов	7	6	6	5	3	1	—
12. Машина для удаления наземного обледенения	7	6	6	5	3	1	—

Таблица 1.6 – Требуемая оснащённость САТА для топливного обеспечения воздушных судов

Наименование спецмашины	Количество САТА в зависимости от среднесуточного расхода авиа ГСМ, м3						
	2500– 1500	1500– 700	700– 300	300– 200	200– 100	100– 50	50– 10
Топливозаправщики							
– малой вместимости (до 15 м3)	—	—	1–3	2–3	2–4	2–3	2–3
– средней вместимости (15–40 м3)	5–8	4–5	4–5	2–4	—	—	—
– большой вместимости (более 40 м3)	4–5	3–4	—	—	—	—	—

Таблица 1.7 – Требуемая оснащённость САТА для обеспечения авиационной безопасности

Наименование спецмашины	Количество спецмашин в зависимости от объемов пассажироперевозок, млн пасс./год						
	10–7	7–4	4–2	2–0,5	0,5–0,3	0,3–0,1	<0,1
Автомобиль повышенной проходимости, оборудованный радиостанцией, не менее	3	3	3	2	1	1	1

Таблица 1.8 – Требуемая оснащённость средствами механизации для содержания аэродрома

Наименование средства механизации	Количество спецмашин в зависимости от площади 1-ой очереди очистки, га						
	100– 70	70–50	50–35	35–25	25–15	15–10	10–5
Очистка искусственных покрытий от снега							
1 Машина аэродромная уборочная, плужно – щеточная с генератором воздушного потока:	4–3	3–2	2	–	–	–	–
2. Фрезерно – роторный снегоочиститель	1	1	1	–	–	–	–
Предупреждение и удаление льдообразований на искусственных покрытиях							
3. Распределитель антигололедного реагента с шириной обработки:							
а) до 14 м	6–5	5–4	4–3	3–2	2–1	1	1
б) до 22 м	4–3	3–2	3–2	2–1	1	1	1
4. Ветровая машина	2	2	1	1	1	1	1
5. Автогрейдер	6–5	5–4	4–3	3–2	3–2	2–1	1
6. Снегопогрузчик	3	3	2	2	1	1	1
7. Автосамосвал	6	6	4	4	2	2	2
8. Измеритель коэффициента сцепления	3	3	2	2	2	2	2
Очистка покрытий от пыли, грязи и посторонних предметов							
9. Машина аэродромной службы	2	2	1	1	1	1	1
10. Машина	6–4	4–3	4–3	3–2	2	1	1
11. Машина тротуаро-убороч ная	4–3	3–2	2	2	2	1	1
12. Машина маркировочная	3	2	2	2	1	1	1

Дополнительные средства механизации							
13. Бульдозер тягового класса от 30 до 180	5–4	4–3	4–3	3–2	3–2	2	2
14. Трактор тягового класса 3	3	2	2	2	1	1	1
15. Трактор тягового класса 10	2	2	1	1	1	1	1

При таком многообразии специальной автомобильной техники аэропортов необходим индивидуальный подход к каждому виду, как в предполагаемой локализации поставок запасных частей и расходных материалов, так и в дальнейшем развитии международной кооперации при организации её материально-технического обслуживания. Специальная автомобильная техника составляет 90% всего объема от крупной аэродромной наземной техники

Таблица 1.9 – Количество средств механизации для эксплуатационного содержания аэродрома

Наименование средства механизации	Количество оборудования в зависимости от категории ВПП по УТПЗ								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Пожарный автомобиль для обеспечения пожаробезопасности полетов ВС	1	1	1	2	2	3	3	4	5
2. Пожарный автомобиль для обеспечения пожаробезопасности наземных объектов аэропорта	—	—	—	1	1	1	1	1	1
3. Санитарный автомобиль	1	1	1	1	2	2	2	3	3
4. Транспортное средство повышенной	1	1	1	1	1	2	2	2	2

проходимости, оборудованное УКВ и КВ радиостанциями (автомобиль гусеничный транспортер)									
5. Автомобиль повышенной проходимости водителя АСР, оборудованный средствами связи и громкоговорящей установкой	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6. Автобус для перевозки экипажа ВС и пассажиров с места аварии ВС	1	1	1	1	1	1	2	2	3
7. Автобус для перевозки пострадавших при аварии ВС	1	1	1	1	1	1	2	2	2
8. Топливозаправщик для слива топлива из поврежденного ВС									
малой вместимости	2	2	2	2	2	2	3	3	3
или средней вместимости	1	1	1	1	1	1	2	2	2
9. Маслозаправщик для слива масла из поврежденного ВС	1	1	1	1	1	1	1	1	1

10. Трап пассажирский самоходный	—	—	—	1	1	2	2	2	2
11. Трап пассажирский самоходный с высотой обслуживания до 5,4 м	—	—	—	—	—	—	1	2	2
12. Аэродромный подвижной электроагрегат	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13. Грузовой автомобиль грузоподъемностью 3–5 тс	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14. Автомобильный тягач для буксировки поврежденного ВС по ВПП и РД и твердому сухому грунту с тягой до:									
50 т	—	—	—	—	—	—	—	1	1
30 т	—	—	—	—	—	—	1	1	1
18 т	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15. Автогрейдер	—	—	—	—	—	1	1	1	1
16. Бульдозер	1	1	1	1	1	1	1	1	1
17. Экскаватор	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Таблица 1.10 – Количество специальной автомобильной техники для обеспечения наземных служб аэропорта

Наименование спецмашины	Количество спецмашин в зависимости от объемов пассажироперевозок, млн пасс./год						
	10–7	7–4	4–2	2–0,5	0,5–0,3	0,3–0,1	<0,1
Средства для аэропортовых транспортных перевозок							
1. Грузовой автомобиль	2	2	2	1	1	1	1

малой грузоподъемнос ти до 3 т							
2. Грузовой автомобиль средней грузоподъемнос тью до 5 т	2	2	2	1	1	1	1
3. Грузовой автомобиль большой грузоподъемнос тью до 10 т	1	1	1	1	1		
4. Легковой автомобиль	5	5	4	3	2	1	1
5. Автобус особо малого класса	10	8	8	6	4	3	2
6. Автобус малого класса	3	3	2	2	1	1	1
7. Автобус среднего класса	1	1	1	—	—	—	—
8. Оперативная машина сопровождения ВС	5	4	3	2	2	1	1
9. Специальная машина службы движения	2	2	1	1	1	1	1
10. Передвижной пункт руководителя полетов	2	2	1	1	1	1	1
11. Санитарный автомобиль	2	2	1	1	1	1	1
12. Трактор тягового класса 3;4;10;25	3	2	2	2	2	1	1
Средства для производства хозяйственных работ							
13. Бульдозер тягового класса 3;4	2	2	1	1	1	1	1

14. Машина для очистки канализационных сетей	1–2	1–2	1–2	–	–	–	–
15. Мусоровоз	1–2	1–2	1–2	–	–	–	–
16. Машина аварийная для водопроводов	1	1	1	–	–	–	–
17. Экскаватор	1–2	1–2	1–2	1	1	1	1
18. Автомобильный подъемный кран, грузоподъемностью не менее:							
5 тс	2	1	1	1	1	1	1
10тс	1	1	1	–	–	–	–
16 тс	2	2	2	–	–	–	–
32 тс	2	2	–	–	–	–	–

Документ устанавливает требуемую оснащённость САТА для основных технологических процессов обслуживания ВС и рассчитывается по формуле 1.1:

$$N = \frac{X \cdot M \cdot T_{\text{ц}} \cdot K_{\text{ис}}}{K_{\text{г}} \cdot 60} \quad (1.1)$$

где, X – интенсивность воздушных судов в час «пик», сам/ч;

M – коэффициент одновременно участвующих в обслуживании одного самолета САТА, шт.;

$T_{\text{ц}}$ – время цикла обслуживания одного самолета, мин;

$K_{\text{ис}}$ – доля самолетов часа «пик», требующих обслуживания данным средством. N - потребное количество средств механизации шт.;

$K_{\text{г}}$ – коэффициент технической готовности средств

Коэффициент, учитывающий количество автобусов, одновременно участвующих в обслуживании одного самолета; для конкретного аэропорта M определяется по формуле 1.2.

$$M = \frac{\sum n_i \cdot a_i}{\sum a_i} \quad (1.2)$$

где n_i – количество автобусов, одновременно обслуживающих одно ВС (1-4);

a_i – количество ВС часа «пик», требующих обслуживания количеством автобусов n_i .

При обслуживании тремя автобусами каждого ВС потребность для каждого аэропорта в пассажирских перронных автобусах:

- Шереметьево: 30 единиц + 10 микроавтобусов;
- Домодедово: 27 единиц + 9 микроавтобусов;
- Внуково: 21 единица + 7 микроавтобусов.

Количество потребных самоходных пассажирских трапов для обслуживания ВС рассчитывается по формуле 1.3.

$$N = \frac{X \cdot M \cdot T_{\text{ц}} \cdot K_{\text{ис}} \cdot K_{\text{д}}}{K_{\text{г}} \cdot 60} \quad (1.3)$$

где, $K_{\text{д}}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное поступление заявок на обслуживание трапами ВС, прибывающих сверх часа «пик» за время, превышающее время часа «пик».

Тогда необходимое количество самоходных трапов:

- Шереметьево: 60 единиц;
- Домодедово: 54 единицы;
- Внуково: 42 единицы.

Количество автотранспортёров, автолифтов, водозаправщиков, газо- и кислородно-зарядных станций и т.д. рассчитывается аналогично по формуле 1.1. Итоговые значения потребного количества спецтранспорта для обслуживания аэропортовых комплексов приведены в таблице 1.11.

Данная номенклатура является рекомендованной минимальной нормой количества автотранспорта для обслуживания аэропортового комплекса. Очевидно, что в реальных условиях работы и эксплуатации аэропортов требуются различные вспомогательные агрегаты для взаимодействия с багажом, особенными

техническими жидкостями, коммунальными потребностями аэропортов, машины для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. В то же время на практике использование и содержание чрезмерно большого количества техники на случай возникновения максимальной нагрузки неэффективно, ввиду редкой 100%-ой загруженности терминалов. Реальные значения количества спецтехники в автопарках аэропортовых комплексов достоверно неизвестны. Данные концепции развития парка наземной техники аэродромов МАУ приведены в таблице 1.12. Заметно сильное снижение количества перронных автобусов в сравнении с рекомендуемыми значениями из-за приоритета на посадку с использованием стационарных «трапов-рукавов».

Таблица 1.11 – Необходимое количество специальной автомобильной техники в соответствии с рекомендуемыми нормами оснащённости аэропортов для эксплуатационного содержания аэродромов, технического и коммерческого обслуживания воздушных судов согласно федеральному агентству воздушного транспорта Российской Федерации.

№	Тип спецтехники	Шереметьево	Домодедово	Внуково	Итого
1	Перронные автобусы	30	27	21	78
2	Микроавтобусы	10	9	7	26
3	Самоходные трапы	60	54	42	156
4	Автомобили с подъёмным кузовом	24	21	17	61
5	Автотранспортёр	18	16	13	47
6	Автомобили с подъёмной платформой	24	21	17	61
7	Автолифт	14	12	10	36
8	Водозаправщики	10	9	7	27
9	Аэродромные кислородозарядные станции	5	5	4	13
10	Унифицированные газозарядные станции	3	3	2	7
11	Маслозаправщики	3	3	2	8
12	Передвижные электроагрегаты	16	15	11	42
13	Подогреватели воздуха	17	15	12	44

14	Аэродромные буксировщики самолетов	51	46	36	132
15	Самоходная площадка обслуживания высоких частей самолета	8	7	6	21
16	Установка воздушного запуска авиадвигателей	6	5	4	16
17	Машина для комплексной уборки салонов	13	12	9	34
18	Машина для удаления наземного обледенения (деайсер)	13	12	9	34
19	Авиатопливообеспечение	39	28	20	87
20	Спецтранспорт для эксплуатационного содержания аэродрома	41	36	29	106
Итого		404	356	276	1036

Таблица 1.12 – Номенклатура спецтранспорта по концепции развития парка техники к 2022 году

№	Наименование техники	Шереметьево	Домодедово	Внуково
1	Аэродромный кондиционер для наземного обслуживания самолетов	50	55	28
2	Аэродромный электрический преобразователь	50	45	32
3	Аэродромный тягач	19	16	11
4	Воздухозаправщик	4	2	3
5	Воздушный пусковой агрегат	32	34	24
6	Топливозаправщик	7	4	3
7	Заправщик специальными жидкостями	345	364	234
8	Багажная тележка	124	156	130
9	Буксировочные водила	28	21	16

10	Подъемные платформы	47	42	24
11	Ленточные багажные погрузчики	28	24	12
12	Установки для удаления льда (деайсеры)	32	21	19
13	Автолифты	182	162	110
14	Стремянки для обслуживания самолетов	71	50	38
15	Пассажирские трапы	63	73	49
16	Перронные автобусы	3	4	3
17	Разметочная машина	8	11	7
18	Компактные вакуумные машины	6	3	3
19	Поливомоечные машины	6	4	3
20	Газонокосилки	6	4	3
21	Машины для измерения коэффициента сцепления	21	19	16
22	Пожарные машины	7	13	8
23	Компактные машины	26	23	19
24	Прицепные машины	4	6	3
25	Роторные снегоочистители	20	24	13
26	Трактора плужно-щеточные	4	3	2
27	Автогрейдер	0	6	3
28	Коммунально-уборочные	11	10	7
29	Компактные для стоянок и территории	7	11	4
30	Погрузчики	24	29	16
31	Самосвалы	11	15	7
32	Ручные снегоочистители	50	55	28

В работе «Многокритериальная система управления обеспечением автомобильной техники аэропортов запасными частями на уровне региона» [13] была рассмотрена проблема, в которой обеспечение запасными частями специальной автомобильной техники аэропортов (САТА) в процессе её эксплуатации оказывает значительное влияние не только на эффективность работы автопарков, но и на безопасность и качество пассажирских авиаперевозок. Регулирование поставок запасных частей для САТА является одной из ключевых задач управления технической эксплуатацией, которая связана с поддержанием работоспособности как отдельных автопарков, так и их совокупности в регионе. Эта задача входит в функции системы управления обеспечением поставок запасных частей (СУОПЗ) для САТА и направлена на определение оптимальных объемов и ассортимента, а также на поддержание необходимых качественных характеристик технической эксплуатации САТА в условиях возможных изменений внешней среды. Реализация данной функции должна осуществляться через математическую модель с последующей разработкой программ, обеспечивающих стабильное функционирование системы для достижения поставленных целей [13].

Проанализировав основные принципы управления, определяющие функции СУОПЗ и на уровне региона сформулировав ряд дополнительных задач, обязательных к реализации, если рассматривать динамически развивающуюся систему, был сделан вывод, что структура управления сложными системами, какой является СУОПЗ, носит иерархический (многоуровневый) характер.

Вследствие чего иерархию системы управления обеспечением поставок запасных частей (СУОПЗ) было принято рассматривать с разных точек зрения:

1. Взаимодействие компонентов: анализируется, как части системы взаимодействуют друг с другом.
2. Структурный подход: рассматривается структура системы в соответствии с физической классификацией её элементов.
3. Функциональный аспект: определяется, какие функции выполняют отдельные элементы системы и как эти функции связаны с достижением более высоких целей, которые в свою очередь способствуют общей цели системы.

4. Целевой подход: оценивается, какие цели заложены в структуру системы с точки зрения её роли в более широкой внешней среде, где она выступает в качестве подсистемы.

Формирование иерархии СУОПЗ, основанной на программно-целевом подходе, будет включать в себя следующие аспекты:

1. Наличие нескольких уровней целей различной значимости требует их упорядочивания через построение дерева целей (ДЦ).

2. Систематизация и упорядочение методов достижения поставленных целей осуществляется с помощью дерева средств (ДС).

3. Определение порядка взаимодействия между деревом целей и деревом средств.

Таким образом, аналитическая модель системы управления обеспечением поставок запасных частей (СУОПЗ) должна быть разработана таким образом, чтобы входные и выходные потоки на её границах были простыми, а критерии, используемые для определения границ системы, были четко идентифицированы и обоснованы в контексте данного исследования.

Ключевым отличием предложенной иерархии целей и подсистем СУОПЗ является то, что на одном уровне с традиционным комплексным критерием качества (обеспечение надежности АТА) находятся такие критерии, как эффективность организации процессов доставки запасных частей с учетом показателей работы различных видов транспорта и эффективность функционирования терминально-складских комплексов в транспортно-логистических сетях поставок [13].

1.3 Вероятностная составляющая возможности появления необходимости в запасных частях для специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах.

Формирование материальных потоков при снабжении предприятий неразрывно связано с координацией действий контрагентов. Поскольку моменты выхода из строя агрегатов носят стохастический характер, проектирование логистических цепочек поставки комплектующих для парка специальной автомобильной техники (САТ) аэропортов требует обязательного внедрения вероятностно-статистических методов прогнозирования ежедневного спроса [206].

Базисом для оценки безотказности технических систем выступает аппарат теории вероятностей и математической статистики, что обуславливает глубокую интеграцию понятийного базиса надежности с вероятностными категориями [14-28].

Границ понятия «надежность» не изменяет следующее определение: надёжность – свойство объекта сохранять во времени способность к выполнению требуемых функций в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Это определение применяют тогда, когда параметрическое описание нецелесообразно (например, для простейших объектов, работоспособность которых характеризуется по типу «да–нет») или невозможно (например, для систем машина–оператор, не все свойства которых могут быть охарактеризованы количественно).

Под объектом исследования в работе рассматривается любая материальная система или ее элемент, подлежащие анализу. Это может быть как отдельное изделие, так и сложный технический комплекс, укомплектованный персоналом и набором специализированных средств.

Классификация обобщенных объектов в теории надежности включает:

- систему, представляющую собой совокупность взаимосвязанных элементов, объединенных общей целью функционирования;
- элементы системы, выступающие в роли составных комплектующих узлов;

– изделие, как конечный продукт производственного цикла (например, специализированный автомобиль, станочное оборудование, подшипниковый узел).

По признаку ремонтпригодности объекты подразделяются на невосстанавливаемые (подлежащие безвозвратной замене при выходе из строя, к которым относятся расходные материалы, лампы, тормозные колодки) и восстанавливаемые (подлежащие регенерации, такие как двигатели, коробки передач, автомобили в целом). Встречаются также системы комбинированного типа, где часть узлов подлежит замене, а часть — восстановлению.

В процессе эксплуатации техническая система проходит через ряд состояний и событий, ключевыми из которых являются:

1 Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособности элемента или системы в целом (полном или частичном).

2 Исправность – состояние, при котором объект полностью соответствует совокупности требований конструкторской и технологической документации, включая второстепенные параметры.

3 Работоспособность – состояние, при котором объект способен выполнять основные функции, соответствуя базовым требованиям по ключевым параметрам.

4 Безотказность – способность системы непрерывно сохранять работоспособность на протяжении заданного временного интервала или наработки в специфических условиях среды.

5 Неисправность – состояние, характеризующееся несоответствием объекта хотя бы одному из регламентированных требований (как основных, так и вспомогательных).

6 Предельное состояние – критическая точка, при которой дальнейшее использование объекта по прямому назначению запрещено или экономически нецелесообразно, а его восстановление невозможно.

Фундаментальные факторы, лимитирующие надежность, носят стохастический характер. В связи с этим отказ трактуется как случайное событие, наработка до которого является случайной величиной, а сам процесс деградации (например, износ) описывается случайной функцией. Следовательно, все

расчетные параметры надежности должны рассматриваться как переменные, принимающие значения из определенного диапазона вероятностей.

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

Наработка до отказа представляет собой объем полезной работы, выполненной объектом с момента ввода в эксплуатацию до регистрации первого отказа.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ определяет шанс того, что в пределах заданного времени t отказ не возникнет, или, иными словами, ресурс объекта до отказа ξ превысит время его фактического функционирования:

$$P(t) = P(\xi > t). \quad (1.4)$$

Вероятность безотказной работы является убывающей функцией времени, обладающей следующими свойствами:

$$0 \leq P(t) \leq 1, \quad P(0) = 1, \quad P(+\infty) = 0$$

По статистическим данным об отказах, полученным из опыта эксплуатации, P_t определяется статистической оценкой по формуле 1.4:

$$P^*(t) = \frac{N(t)}{N_0} = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} \quad (1.5)$$

где, N_0 – общее число образцов, находящихся на испытании;

$N(t)$ – число исправно работающих образцов в момент времени t ,

$n(t)$ – число отказавших образцов в течение времени t .

Знак * обозначает статистическую оценку соответствующих показателей надежности. Вероятность безотказной работы, как критерий надежности, обладает следующими достоинствами:

– характеризует надежность во времени, являясь интервальной оценкой;

- определяет многие важные показатели техники, например эффективность, живучесть, риск;
- сравнительно просто вычисляется и определяется по статистическим данным об отказах техники;
- достаточно полно характеризует надежность невосстанавливаемых объектов.

Техническое состояние автомобиля (агрегата, механизма, соединения) определяется совокупностью изменяющихся свойств его элементов, характеризуемых текущим значением конструктивных параметров Y_i . Обычно текущие значения конструктивных параметров связывают с наработкой.

Наработка – продолжительность работы изделия, измеряемая единицами пробега (километры), времени (часы), числом циклов. Визуально зависимость технического состояния от наработки можно оценить по графику на рисунке 1.6.

Автомобиль представляет собой сложную систему, совокупность действующих элементов – сборочных единиц и деталей, обеспечивающих выполнение ее функций. По отношению к автомобилю элементами являются агрегаты, узлы и механизмы, а по отношению к последним – детали.

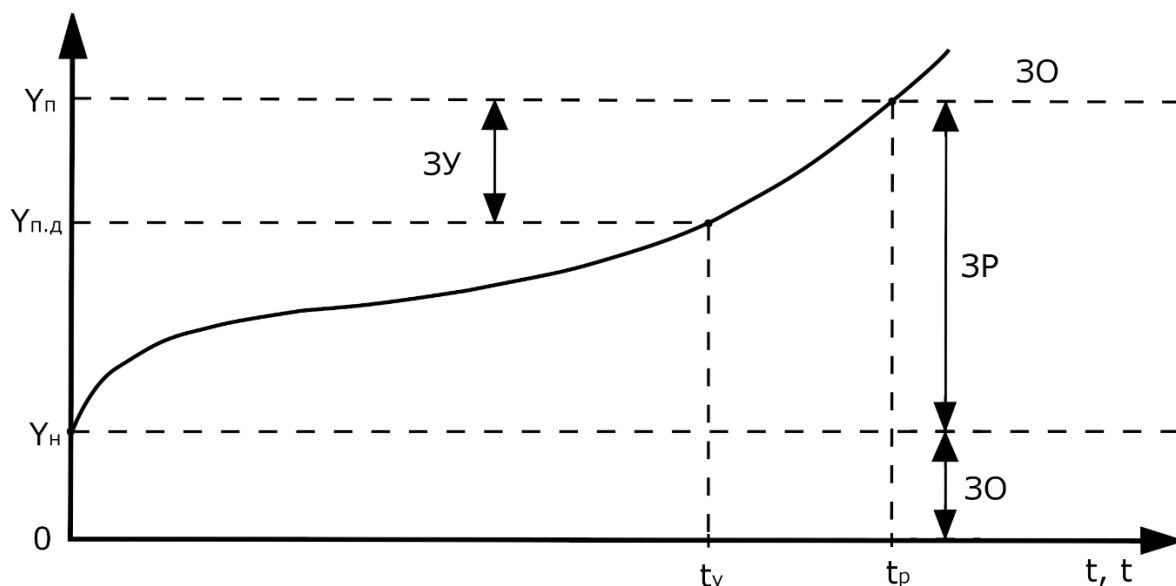


Рисунок 1.6 – График функции зависимости технического состояния автомобиля от наработки.

На графике:

- ЗР – зона работоспособности;
- ЗО – зона отказов;
- ЗУ – зона упреждения отказов;
- $Y_{п.д}$ – предельно допустимое значение параметра;
- I_p – ресурс изделия;
- I_y – ресурс упреждения

Современный автомобиль содержит до 20 тысяч деталей, из которых порядка 45% подвержены интенсивной деградации в процессе работы, а около 20% имеют ресурс, уступающий общему сроку службы машины. При этом 5% деталей критически важны для безопасности движения, и еще 5% относятся к категории «критических по надежности», требуя частой замены. Именно эти группы составляют ядро внимания служб технической эксплуатации и логистического снабжения. Статистика потребления запчастей демонстрирует, что всего 2–3% номенклатуры формируют 40–50% суммарных затрат на ремонтный фонд. Указанные закономерности диктуют необходимость внедрения системного мониторинга для данных групп узлов, что напрямую влияет на оптимизацию эксплуатационных бюджетов и выстраивание эффективных логистических цепочек. [30-36].

Система диагностирования интегрирована в общую структуру ТО и ремонта. На автотранспортных предприятиях (АТП) она обеспечивает процессы целевым информационным массивом о фактическом состоянии каждой единицы техники. Организация диагностических работ дублирует логику ТО: дорожный контроль базируется на встроенных системах, ежедневное обслуживание опирается на контрольные осмотры, ТО-1 сопровождается комплексом Д-1 (с акцентом на узлы безопасности), а перед ТО-2 и текущим ремонтом (ТР) применяется углубленная диагностика Д-2.

Система технического обслуживания (ТО) и ремонта базируется на двух фундаментальных компонентах: структуре и нормативной базе. Структура системы определяется количеством и классификацией воздействий, реализуемых на различных этапах процесса, а также их взаимосвязью. Нормативы включают

параметризированные значения, такие как периодичность технических воздействий, трудоемкость операций, перечень выполняемых работ и дополнительные критерии, обеспечивающие стандартизацию и оптимизацию процессов обслуживания.

Формирование структуры системы ТО и ремонта подчинено влиянию ряда факторов, среди которых уровень надежности и технологических характеристик автомобилей, функциональные задачи, возложенные на автомобильный транспорт и технические эксплуатационные агентства (ТЭА), специфика условий эксплуатации, доступность материально-технических и человеческих ресурсов. Дополнительно учитывается совокупность организационно-технических ограничений, регламентирующих реализацию мероприятий по поддержанию работоспособности транспортных средств. Эти параметры определяют адаптацию системы к реальным эксплуатационным условиям и обеспечивают ее функциональную эффективность.

Ключевыми детерминантами эффективности системы ТО выступают корректно сформированные перечни и периодичности профилактических операций. Сложность структурирования ТО заключается в его многообразии: система включает 8–10 видов работ и охватывает 150–280 конкретных объектов обслуживания, требующих превентивных воздействий.

Расчет норм расхода комплектующих и материалов базируется на объемах заказываемых партий, складских запасах и финансовых затратах конкретного АТП. В практике применяются как укрупненные, так и номенклатурные нормативы.

Укрупненные нормативы используются для стратегического планирования ТО и Р. В усредненной структуре расходов на ТО и Р доля запасных частей достигает 40%, а материалов – 15%. Данные нормы базируются на фактических затратах, ресурсе и стоимости деталей, с возможностью оперативной корректировки под условия конкретного предприятия.

Номенклатурные нормы. Устанавливает средний расход запасных частей по каждой детали в штуках на 100 автомобилей в год. В общем случае норма расхода определяется в зависимости от ведущей функции за определенный период времени.

$$H = \frac{\Omega(t)}{t} \cdot 100. \quad (1.6)$$

где t – продолжительность периода в годах за которое определено значение $\Omega(t)$

Фактические нормы рассчитываются приближенными методами:

1. По ресурсу до первой замены:

$$H_I = \frac{100 \cdot L_r}{L_1 \cdot \eta} \quad (1.7)$$

где, L_r – годовой пробег, км;

L_1 – пробег до первой замены;

η – коэффициент восстановления ресурса после ремонта

2. По числу замен деталей за срок службы t_0 :

$$H_{II} = \frac{100}{\eta} \cdot \left(\frac{L_r}{L_1} - \frac{1}{t_0} \right) \quad (1.8)$$

3. По числу замен с учетом вариации ресурса детали:

$$H_{III} = \left(\frac{L_r \cdot t_0 - L_1}{\eta \cdot L_1} + 0,5 \cdot \left(\frac{V^2}{\eta} + 1 \right) \right) \frac{100}{t_0} \quad (1.9)$$

где, V^2 - коэффициент вариации.

С увеличением коэффициента V норма расхода деталей увеличивается. При увеличении интенсивности эксплуатации норма расхода деталей возрастает.

Очевидно, что скорость деградации ЗЧ зависит от качества эксплуатации. Фактический расход запасных частей с учетом категории эксплуатации не должен превышать установленных норм. Для определения норм расхода запасных частей необходимы статистические данные по условиям эксплуатации, сроке работы, надежности и качеству использования узлов и агрегатов.

Решение задачи по нормированию потребности в запасных частях осложняется из-за многообразия факторов, реально влияющих на расход запасных

частей и материалов. Всю совокупность этих факторов можно разделить на 4 группы: конструктивные, эксплуатационные, технологические и организационные.

Рассмотрим статистику отказов деталей специальной автомобильной техники для определения законов распределения вероятностей пробега с момента начала эксплуатации узла (установка взамен отказавшей) до момента сбора данных в службе эксплуатации для оценки параметра потока отказов.

При формировании распределения в работе принято допущение о неизменности количества единиц САТА на выбранном отрезке времени, по которому реализуются процедуры построения показателей отказов. При первом рассмотрении сезонная составляющая учитываться не будет. Кроме того, для всех аэропортов МАУ можно считать постоянство параметра потока отказов в достаточно продолжительном отрезке времени, т.е. усредненное число единиц заменены в единицу времени постоянно.

Обозначим пробег до выхода из строя узла через t_f , а пробег от момента установки до момента контроля – t_r . Плотность распределения для будет обозначаться функцией вероятностей $f(t)$, а для – t_r через $p(t)$.

Выберем два временных интервала длиной Δt , - на расстоянии t_1 от момента контроля данных. При этом до «нулевого» момента от точки t_1 будет иметь место $\omega(t_1) \cdot \Delta t \cdot R(t_1)$ рабочих (не отказавших) узлов. При этом $R(t)$ – функция безотказности будет определяться как:

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt \quad (1.10)$$

Соответственно от момента t_2 до нулевого не будет отказов у $\omega(t_2) \cdot \Delta t \cdot R(t_2)$ узлов или агрегатов. Принимая во внимание, что имеет место допущение о равенстве $w(t)=w_0$, имеется справедливость следующего преобразования:

$$f(t) \rightarrow p(t): p(t) = \frac{\omega_0 R(t)}{\int_0^t \omega_0 R(t) dt} \quad (1.11)$$

Интеграл в знаменателе является нормирующим множителем, и данная функция будет удовлетворять свойствам плотности распределения. В результате, полученный закон распределения для работающих узлов по форме представляет из

себя функцию безотказности, что соответствует обратному интегральному закону, а математическое ожидание полученной функции $p(t)$ равно:

$$M_{\text{ож}}(p) = \frac{\omega_0 \cdot 0,5 \cdot (M_{\text{ож}}^2(f) + D(f))}{\omega_0 \cdot M_{\text{ож}}(f)} = M_{\text{ож}}(f) \cdot \frac{1+v^2}{2} \quad (1.12)$$

где, $D(f)$ – дисперсия функции $f(t)$;

$M_{\text{ожид}}(f)$ – математическое ожидание $f(t)$;

v – коэффициент вариации.

В результате для экспоненциального распределения исходной случайной величины, определяющей величину пробега до отказа, средние значения будут равны. В то же время, для выбранных случайных величин, у которых коэффициент вариации принимает достаточно малые значения (так, для нормального закона распределения коэффициент вариации равен 0,1) значение $M_{\text{ожид}}(p)$ будет существенно отличаться от величины $M_{\text{ожид}}(f)$.

Таким образом, собрав в единую таблицу собранные данные по пробегам всех не отказавших узлов и деталей к форме плотности распределения (проведя нормировку) и учитывая, что $R(0)=1$ имеется возможность определения искомой усредненной наработки на отказ выбранного узла специальной автомобильной техники МАУ [206].

Множество методов расчета числа номенклатуры и объёма запасных частей относится к теории восстановления – одному из главных элементов теории надежности. Эта группа математических подходов включает в себя методы, основанные на асимптотических подходах, формулах, а также методы, основанные на использовании потока отказов деталей в функции наработок от стадии ввода в эксплуатацию до стадии утилизации, а также в виде закономерности распределения выработки элемента до первого отказа, а также серии дальнейших отказов запасных частей. Изначальными данными в этом случае служат статистические данные о периодичности сбоев работы и степени отказов той или иной рабочей единицы, данная информация устанавливается изготовителем, также указывается время наработки до отказа и до замены, квадратичные отклонения. Поток замен

или среднее число замен деталей по теории восстановления и есть функция восстановления, ее принято находить по уравнению Кокса и Смита

$$\Omega(t) = F(t) + \int_0^1 \Omega(t-r) \cdot q(r) dr \quad (1.13)$$

где, $F(t)$ – функция распределения ресурса начального элемента;

r – плотность функции распределения начального элемента.

Процесс замены детали на запасную вместо отработавшей свой срок и есть процесс восстановления. Новая деталь, которая устанавливается на заводе, начинает эксплуатироваться в момент времени равный $T=0$, а после выработки заменяется на новую.

Остаточное время наработки до отказа определяется как степень износа детали к ее первоначальному состоянию. Кроме этого, можно говорить и о замене детали не только по причине временного и физического износа, но также и по причине единовременных отказов и поломок по причинам разного характера, как-то авария. Следует отметить и тот факт, что ресурс сменной детали чаще всего ниже ресурса новой детали, это обусловлено одновременным износом нескольких деталей в одном агрегате и их неодновременную замену, вследствие чего возникают дополнительные зазоры, а, следовательно, и более быстрый износ [206].

К методу оценки износа необходимо сопоставить показатели эксплуатации техники, степени отказов как целых машин, так и каждого агрегата в отдельности. В работе уточнение приведено к усредненным отказам наземной техники аэропортов по проанализированным аэропортам МАУ. Главной проблемой при расчете потребности в запасных частях для любой техники является сложность ремонтного процесса при замене отдельного элемента. Наиболее эффективным методом расчёта потребности в запасных частях наземной техники аэропортов на этапе эксплуатации является практический метод, основанный на средних величинах пробега между капитальным ремонтом детали, по формуле:

$$\Pi_{\tau} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\delta_1^2}{L_{1R} \cdot L_{12}} + 1 \right) \cdot \frac{R_{mkr} \frac{L_{1R}}{\delta_{1R}}}{L_{1R}} \quad (1.14)$$

где, R_{mkr} – средняя величина пробега между КР детали;

L_{1R} , δ_{1R} – средняя величина и среднее квадратичное отклонение наработки детали, установленной при КР [206].

Данный подход определения P_t оправдан характерными особенностями процесса технического обслуживания и ремонта автомобилей зарубежного производства, преобладающих в парках САТА МАУ:

1. Нормативная периодичность работ технического обслуживания и ремонта обязательно производится согласно регламенту фирмы-производителя.
2. Работы по ремонту автомобилей не предъявляют высоких требований к объёму трудоёмкости работ и высокой квалификации персонала, так как выполняются агрегатным методом ремонта. При этом стоимость запасных частей и заменяемых агрегатов достаточно велика
3. Согласно регламентам фирмы-производителя, конструкция многих автомобилей не предусматривает проведение КР. В связи с этим, для расчёта программы по техническому обслуживанию и ремонту и, соответственно, программы поставок запасных частей можно за расчетный цикл принимать регламентированный продуцентом пробег за полный цикл технического обслуживания. Изменение технических нормативных значений технического обслуживания в зависимости от условий эксплуатации выполняется за счет изменения типов и количества технических обслуживаний в рамках определённого цикла, регламентируемым фирмой-производителем автомобилей.

Ключевое понятие теории надежности — это понятие отказа, измеряемое, соответственно, интервальным показателем. Вероятность отказа является противоположной функцией вероятности безотказной работы и вычисляется по формуле:

$$Q(t) = P(t) - 1 \quad (1.15)$$

При наличии данных о значении вероятности отказа в каждый момент времени эксплуатации детали от «нулевой» точки, характеризующей начало работы детали после её установки, до точки предела, когда деталь выработала весь

свой ресурс задача определения заданного момента времени от вероятности отказа является тривиальной, однако на практике значение функции неизвестно для только что установленной детали для моментов времени в будущем.

Узнать достоверную вероятность отказа работающей детали не представляется возможным, значения всегда будут в определённом интервале с долей вероятности. Самым близким значением можно считать статистически определённые значения вероятности отказа для каждого типа детали, вплоть до её модели, материала и завода изготовителя. Таким образом стандартизация номенклатуры используемых деталей помогает не только в формировании стабильных логистических цепочек поставок, а также в создании базы известных значений вероятности отказа для новых деталей. Значения функции вероятности отказа может быть определена из большего объёма данных по диагностике с учётом наработки на время ТО, промежуточные значения могут быть определены интерполяцией.

Наработка на отказ (для восстанавливаемых изделий) – отношение суммарной наработки к математическому ожиданию числа отказов за этот период. Нарabотка на отказ и наработка до отказа являются наиболее наглядными метриками надёжности. Как математическое ожидание случайной величины, наработка на отказ определяется как:

$$T_0 = \int_0^{\infty} f(t)dt \quad (1.16)$$

где, $f(t)$ – дифференциальная функция распределения наработки на отказ.

А статистически как:

$$T_0^* = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{m} \quad (1.17)$$

где, m – число отказов изделия за период t ;

t_i – время исправной работы б изделия между $(i - 1)$ -м и i -м отказами.

Средняя наработка до отказа T_{cp} – математическое ожидание наработки изделия до первого отказа, подсчитывается по формуле:

$$T_{cp}^* = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} t_i}{N_0} \quad (1.18)$$

где, t_i —время работы i -го изделия до первого отказа.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ — условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого изделия, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник. Для аналитического определения интенсивности отказов по известному закону распределения наработки до отказа применяется формула:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} \quad (1.19)$$

Статистическое значение интенсивности отказов может быть определено как отношение числа изделий, отказавших в единицу времени, к среднему числу изделий, исправно работающих в данный промежуток времени:

$$\lambda^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp}\Delta t} \quad (1.20)$$

где, Δt — принятый достаточно малый интервал времени;

$n(\Delta t)$ — количество n изделий, отказавших в интервале от $t-\Delta t/2$ до $t+\Delta t/2$;

$N_{cp}=(N_1+N_2)/2$ — среднее количество изделий, исправно работающих в интервале Δt ;

N_1 — количество изделий, исправно работающих в начале интервала;

N_2 — количество изделий, исправно работающих в конце интервала.

Кривая интенсивности (рис. 1.7) имеет три участка [39]: период приработки ($0 - t_1$), период нормальной эксплуатации ($t_1 - t_2$), период интенсивного износа и старения (t_2 и далее).

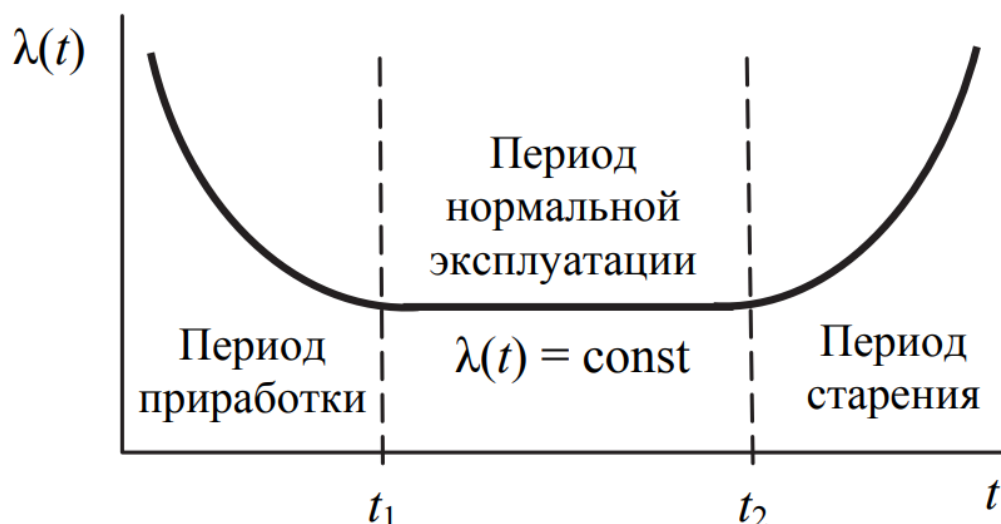


Рисунок 1.7 – График функции интенсивности отказов

Интенсивность отказов выступает ключевым количественным показателем, характеризующим надежность технической системы, позволяющим моделировать производительность техники в различных стадиях жизненного цикла и выделять периоды с большей вероятностью отказов, что, в свою очередь, влияет на оптимизацию режимов работы техники и выработки предложений по модернизации конструктивных элементов техники. Интенсивность отказов также используется для вычисления характеристик надежности техники, и делает данный параметр крайне необходимым при проверочных и прогнозных действиях.

Интенсивность отказов служит ключевым индикатором надежности, позволяющим моделировать производительность на разных стадиях жизненного цикла, выявлять пиковые зоны вероятности отказов и оптимизировать режимы эксплуатации. Данный параметр критически важен для проверочных и прогнозных расчетов. Однако в производственной практике его применение ограничено: он корректно описывает систему лишь до первого отказа. После ремонтных вмешательств для восстанавливаемых систем требуется привлечение альтернативных методов оценки.

Параметр потока отказов $\omega(t)$ – плотность вероятности возникновения отказа восстанавливаемого изделия, определяемая для рассматриваемого момента

времени. Вероятностное значение параметра потока отказов определяется по уравнению [37-58]:

$$\omega(t) = \frac{dH(t)}{dt} \quad (1.21)$$

где, $H(t)$ – функция надежности.

Для определения статистического значения $\omega(t)$ используется формула:

$$\omega(t) = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \cdot (t + \Delta t) - \sum_{i=1}^N m_i}{N_0 \cdot \Delta t} \quad (1.22)$$

где, N_0 – количество изделий, поставленных под наблюдение;

Δt – принятый интервал времени;

m_i – количество отказов i -го изделия в период от t до $t + \Delta t$.

Параметр потока отказов – это среднее количество отказов ремонтируемых изделий в единицу времени обладает следующими основными преимуществами:

- позволяет легко установить связь между остальными показателями надежности;
- достаточно полно характеризует надежность ремонтируемого изделия;
- позволяет определять номенклатуру и количество запасных деталей, необходимых для нормальной эксплуатации оборудования;
- дает возможность правильно планировать частоту профилактических мероприятий.

1.4 Определение момента возникновения потребности в запасных частях для специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах.

Критерий отказа – признак или совокупность признаков нарушения работоспособного состояния объекта, установленные в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации. Причина отказа – явления, процессы, события и состояния, вызвавшие возникновение отказа объекта.

Последствия отказа – явления, процессы, события и состояния, обусловленные возникновением отказа объекта [61-64].

Классификация отказов необходима для выявления их причин и разработки мер по предупреждению и устранению. Существует несколько квалификационных признаков, которые рассмотрим на примере автомобильного транспорта.

1. По влиянию на работоспособность объекта различают:

- отказ его элементов;
- отказ, вызывающий неисправность или отказ объекта в целом.

Например, перегорание лампы плафона вызывает отказ лампы (элемента), но не автомобиля, а отказ тормозной системы или рулевого управления является одновременно и отказом автомобиля, так как при этом нельзя продолжать движение.

2. По источнику возникновения различают:

- конструктивный отказ – отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования;

- производственный отказ – отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии;

- эксплуатационный отказ – отказ, возникший по причине, связанной с нарушением установленных правил и (или) условий эксплуатации (например, перегрузкой автомобиля, применением нерекомендуемых топлив или смазочных материалов и т.п.).

3. По связи с отказами других элементов различают:

- зависимый отказ – отказ, обусловленный другими отказами (например, задиры зеркала цилиндра двигателя из-за разрушения поршневого кольца, отказ аккумуляторной батареи из-за неисправности реле-регулятора);

- независимый отказ – отказ, не обусловленный другими отказами (например, прокол шины на дороге).

4. По характеру (закономерности) возникновения и возможности прогнозирования различают:

– постепенный отказ – отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта. Для постепенных отказов характерен последовательный переход объекта из исправного начального состояния в состояние отказа через ряд промежуточных состояний. Особенность постепенных отказов заключается, во-первых, в том, что они в принципе могут быть предотвращены в результате своевременного выполнения технического обслуживания (ТО). Вторая их особенность состоит в монотонности изменения технического состояния, что создает предпосылки для его прогнозирования. На постепенные отказы приходится от 40 до 70 % всех отказов;

– внезапный отказ – отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта. Примером внезапного отказа является повреждение или разрушение вследствие превышения допустимого уровня нагрузки, которое в принципе может произойти в любой момент работы изделия;

– перемежающийся отказ – многократно возникающий самоустраняющийся отказ одного и того же характера. Такой отказ, например, возникает при ослаблении крепления электрического контакта.

5. По частоте возникновения (наработке) для современных автомобилей различают отказы с малой наработкой (3...4 тыс. км), со средней наработкой (до 12...16 тыс. км) и с большой наработкой (свыше 12...16 тыс. км).

Наработка – продолжительность или объем работы объекта; наработка может быть как непрерывной величиной (продолжительность работы в часах, пробег в километрах и т. п.), так и целочисленной величиной (число рабочих циклов, запусков и т. п.).

7. По влиянию на потери рабочего времени автомобиля отказы подразделяют на отказы, устраняемые:

– без потери рабочего времени, т.е. при ТО или в нерабочее (межсменное) время,

– с потерей рабочего времени. В качестве примера ниже приведена доля отказов (в процентах) агрегатов и систем, которые устраняются с потерей рабочего времени (автомобиль большой грузоподъемности): рама – 100 %, двигатель – 78 %, коробка передач – 75 %, сцепление – 65 %, кузов – 61 %, задний мост – 29 %, передний мост – 25 %, электрооборудование – 23 %, подвеска – 21 %, система питания – 17 %.

Необходимость в запасных частях возникает в момент возникновения отказа в работе агрегата автомобильного транспорта. Решение задачи максимально эффективно, если в момент отказа запасные части уже присутствуют на хранении на складах технической службы, однако ввиду причин, рассмотренных в предыдущей главе гарантировать нахождение замены проблематично. На практике закупка запасных частей зачастую производится в момент возникновения необходимости в них, соответственно в момент возникновения отказа. Для большинства АТП с конвенциональными, распространёнными видами транспортов ожидание детали после её заказа может быть незначительным, от прибытия в тот же день до трёх-четырёх дней, однако, для специальной автомобильной техники возможность быстрой доставки затруднена ввиду малой распространённости необходимых агрегатов, высокой составляющей наличия импортной техники в парках аэропортов. Рассмотрим два сценария.

Сценарий 1. Закупка производится в момент отказа.

Простой специальной автомобильной техники, ввиду необходимости ремонта, целиком зависит от скорости доставки необходимых запасных частей. В это время машина не может выполнять свои функции, что негативно сказывается на эффективности работы аэропортового комплекса, может приводить к задержкам в предоставлении услуг по буксированию летательных аппаратов, перевозке пассажиров к самолётам и т.п. Поломка критически важной специальной автомобильной техники, находящимся в дефиците на АТП требует перепланировки деятельности парка с распределением его нагрузки на другие транспортные средства.

Всё время простоя транспортного средства на ремонте приводит к убыткам в компании и может привести к каскаду потерь при одновременном отказе нескольких специальных автомобилей, выполняющих похожие функции. Для устранения этих проблем может использоваться резервный ресурс по АТП, однако содержание дополнительных транспортных средств на случай поломки неэффективно. Решение – предварительная закупка запасных деталей.

Сценарий 2. В АТП имеется на хранении все труднодоступные детали. Закупка производится в момент отказа, однако приобретённая деталь предназначена не для отказавшего транспортного средства, а для пополнения ресурса хранения.

В данном сценарии при поломке тут же начинается ремонт используя имеющиеся запасные части на складе технической службы, а пополнение этих ресурсов происходит параллельно с ремонтом. Очевидным плюсом является полная ликвидация простоя автомобиля в ремонте ввиду ожидания поступления потребных деталей на баланс предприятия. Автомобиль сразу же отправляется в ремонт и может приступить к выполнению своих функций по его окончании.

Склад запасных частей служит буфером, который обеспечивает техническую службу необходимыми элементами для продолжения функционирования специальной автомобильной техники, однако содержание тех самых запасных частей тоже приводит к убыткам. Требуется отдельное место складирования деталей, требуется система их содержания, отслеживания наличия конкретных видов в запасе и, самое главное, требует, по сути, заранее осуществлённых расходов на будущее. Вложение капитала в хранение неиспользуемых частей для гарантирования их наличия в будущем сильно сказывается на капиталовложениях предприятия, ресурсы, потраченные на страховку будущего, могут быть более эффективно использованы в настоящем.

Для оценки эффективности данных, противоположных подходов стоит рассмотреть эффективности одной детали с точки зрения её времени нахождения на предприятии. В идеальном сценарии деталь вводится в эксплуатацию в момент её прибытия на производство. Пусть условная потеря в эффективности для детали

обозначается как ε , а время нахождения детали на балансе t , тогда очевидно, что ε является функцией времени:

$$\varepsilon = f(t) = \varepsilon(t) \quad (1.23)$$

Простой детали на складе не в использовании будут неэффективны, так как существует более эффективная деталь, которая прибыла бы на день позже. Тогда график потери эффективности использования детали принимает вид рисунка 1.8. Линейная сущность графика оправдывается равноценность каждого дня отсутствия детали в работе, следовательно, зависимости потери эффективности от времени – линейная.

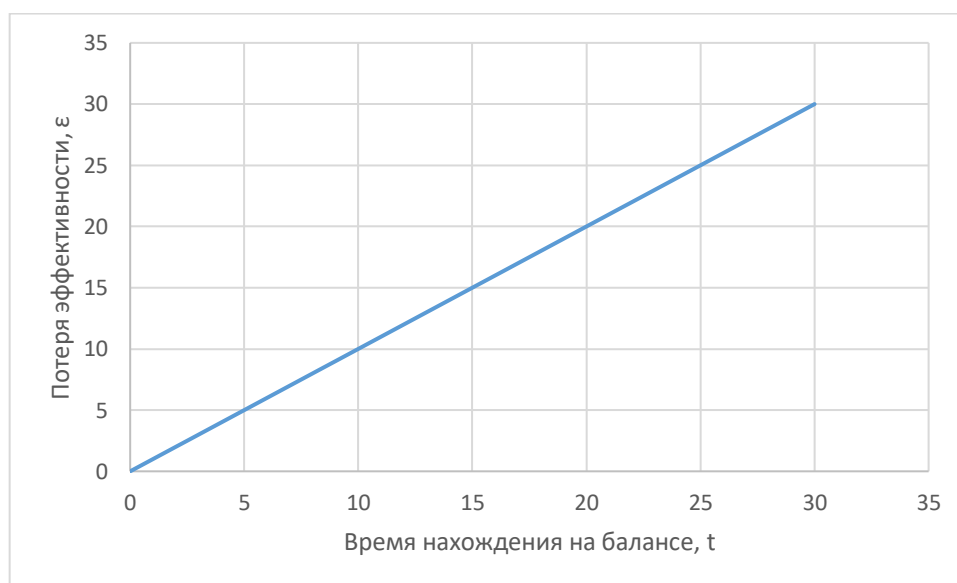


Рисунок 1.8 – График убытков от простоя детали на хранении.

Сценарий 1 обеспечивает минимальные убытки от простоя детали, однако здесь проявляется иная составляющая убытков, простоя специальной автомобильной техники в ожидании детали. Очевидно, что простой работы целой единицы транспорта приносит больше убытков, чем простой одной детали. Однако простой специальной автомобильной техники зависит целиком и полностью от наличия данной детали на производстве. Тогда, приняв негативное t как время отсутствия потребной детали получаем график на рисунке 1.9.



Рисунок 1.9 – График убытков от времени нахождения потребной для ремонта детали на хранении

По графику видно, что максимально эффективная деталь прибывает на предприятие в момент возникновения отказа. Таким образом опишем сценарий 3.

Сценарий 3. Закупка детали производится в момент времени $-t$, где нулевая точка, момент времени возникновения отказа, а значение t , срок поставки детали логистической компанией на предприятие. Прибывшая деталь сразу поступает в технический отдел аэропорта и устанавливается на технику для дальнейшей эксплуатации.

Данный сценарий берёт все преимущества двух, описанных ранее, такие как:

- отсутствие влияния срока доставки на время простоя техники в ремонте;
- отсутствие необходимости в содержании резерва запасных частей.

Сложность использования сценария кроется в невозможности достоверного определения значения t ввиду вероятностной составляющей отказа работы агрегатов специальной автомобильной техники. Деталь с низкой вероятностью отказа всё равно может нуждаться в ремонте, в то время как долго эксплуатируемая деталь с высокой оценкой вероятности отказа может прослужить ещё много времени.

Проблемой повышения эффективности систем автосервиса за счет прогнозирования закупки запасных частей занимались такие ученые, как Е. И.

Кривенко, Г. В. Крамаренко, О. Д. Маркин, О. С. Егорова, М. Я. Пронштейн, О. С. Мудунов, Е. А. Кирсанов, В. К. Толкачев, Л. Б. Миротин, В. А. Щетина, А. А. Таржибаев, В. В. Волгин, И. И. Кривенко и др. Вышеперечисленные ученые в основном решали проблему потребности организаций автосервиса в запасных частях для закупок последних. Однако нерешенной до сих пор остается проблема изучения процесса расхода запасных частей.

Для максимально точного определения значения времени применяются математические модели, которые способны определить временной период, где риск выхода из строя детали преобладает свыше допустимого предела для определенного узла.

В этих целях применимы методы предиктивной аналитики (методы прогнозирования).

Методы вычислений.

Как правило, методы вычислений используются для оценки работоспособности оборудования исходя из практики его использования на соответствующем производстве. Главным условием реализации метода вычислений (прогнозирования) является наличие сведений о прошлой эксплуатации, в случае отсутствия этих данных метод становится неприменимым. Также, при наличии массива данных об истории эксплуатации, вычислительные методы позволяют более точно спрогнозировать сценарий развития ситуации.

Особенность методов вычислений базируется на возможности предопределить компоненту диагностического параметра, в целях корректного моделирования, что становится возможным при наличии достаточного массива данных и применения интерполяционного полинома Ньютона и Лагранжа. Корректность прогнозирования зависит от правильно выстроенного математического аппарата и корректного объема и качества данных.

Метод повышения отказоустойчивости.

В современных аэропортах простой техники обходится эксплуатантам в многомиллионные убытки. Стандарт IATF 16949 является отраслевым стандартом для автомобильной промышленности и требует от производителей внедрять

эффективные методы управления надежностью оборудования. В этом контексте MTBF (Mean Time Between Failures) и MTTF (Mean Time To Failure) становятся незаменимыми инструментами для прогнозирования отказов, оптимизации технического обслуживания и минимизации простоев.

MTTF (Mean Time To Failure) измеряет среднюю наработку до отказа неремонтопригодных компонентов. Применяется для: подшипников, датчиков, фильтров, электронных компонентов и др.

Разница между этими терминами заключается в том, что в то время, как среднее время безотказной работы используется для продуктов, которые могут быть отремонтированы и возвращены в использование, MTTF используется для невозстанавливаемых изделий. Когда MTTF используется в качестве меры, ремонт невозможен.

Для идеальных условий момент возникновения отказов и вероятность распределения наработки всех деталей до отказа минимальна. К сожалению, такой картины, на практике не наблюдается. Это обусловлено тем, что имеется разброс в качестве материала, имеются допуски на параметры деталей и на каждый технологический процесс ее изготовления, и существенные различия в условиях эксплуатации. Поэтому скорость изнашивания (уменьшения ресурса) неодинакова.

Зависимость наработки деталей приборов от интенсивности работы показывает, что при выполнении идеальных условий эксплуатации прибора все его детали изнашиваются одновременно, и наоборот в реальных условиях эксплуатации детали (узлы, агрегаты) выходят из строя в разные периоды времени, что соответственно существенно влияет на определение момента необходимости закупки запасных частей по третьему сценарию.

Практически вероятность безотказной работы ($P(t_p)$) можно определить по формуле:

$$P(t_{p1}, t_{p2}) = \frac{[N_0 - n(t_{p1}, t_{p2})]}{N_0} \quad (1.24)$$

где, N_0 – количество приборов до начала испытаний (наблюдений);

tp_1, tp_2 – отрезок времени (наработки), в течение которого велись испытания (наблюдения);

$n(tp_1, tp_2)$ – количество приборов, отказавших за время tp_1, tp_2

Следует учитывать то, что по формуле возможно определить вероятность безотказной работы только за отрезок времени tp_1, tp_2 и невозможно определить за другой период времени и предсказать в будущем. Прогнозирование вероятности безотказной работы можно осуществлять на основе теоретических зависимостей, когда известны законы распределения времени возникновения отказов, т.е. когда известны функции распределения времени для различных законов.

При изучении сложных технологических, транспортных, АСУ и других систем используют математические модели, основанные на марковских случайных процессах (в честь русского математика А.А. Маркова).

Если случайная величина изменяется в процессе опыта, то возникает случайная функция – функция, которая в результате опыта может принять тот или другой вид, заранее неизвестный. Если аргументом случайной функции является время, то такая случайная функция называется вероятностным (случайным) процессом.

Потоком событий называется последовательность однородных событий, появляющихся одно за другим в случайные моменты времени. Примеры: поток вызовов на телефонной станции; поток машин, подъезжающих на заправочную станцию; поток заявок на ремонт, поступающих в ремонтную организацию и т.п. События, образующие поток, в общем случае могут быть и неоднородными, например, если в потоке автомашин, прибывающих на заправку, различать легковые и грузовые.

Понятия «поток событий» и «процесс» взаимосвязаны. Процесс смены состояний объекта, например, вызывается потоками отказов и потоками восстановлений.

Особенность этого процесса состоит в том, что вероятность любого состояния системы (например, автомобиля, группы автомобилей) в будущем

зависит только от ее состояния в настоящее время и не зависит от того, когда и какими путями она пришла в это состояние. Так, работоспособность автомобиля в будущем зависит только от фактического технического состояния, к которому автомобиль может прийти по-разному.

В теории технической эксплуатации наибольшее применение находят цепи Маркова. В цепях Маркова четко определены состояния системы $S_1, S_2, \dots, S_n$. Переход из состояния в состояние осуществляется в дискретные моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_k$ и определяется переходными вероятностями [65-67].

Цепи Маркова хорошо иллюстрируются графом (рис. 1.10) состояния системы, на котором кружками или прямоугольниками отмечены сами состояния и стрелками направления переходов [47]. Если на графе под стрелками указаны вероятности перехода, то он называется размеченным графом состояний.

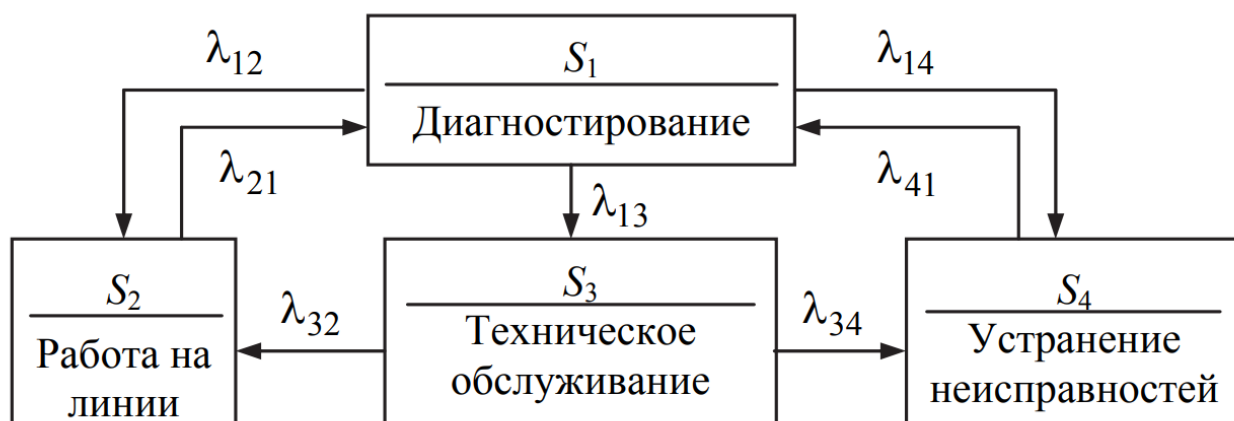


Рисунок 1.10 – Размеченный граф состояний цепи Маркова

Марковский процесс с дискретным состоянием и непрерывным временем (непрерывные цепи Маркова) характеризует функционирование систем, у которых переход из состояния в состояние происходит в случайные моменты времени, а сами состояния дискретны, например, появление отказа, неисправности. Для этого процесса рассматривают плотность вероятностей перехода λ_{ij} , которая определяется как предел отношения вероятности перехода системы за малый промежуток времени Δt из состояния S_i в состояние S_j к длине промежутка Δt , стремящейся к нулю:

$$\lambda_{ij} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_{ij}(\Delta t)}{\Delta t} \quad (1.25)$$

где, P_{ij} – вероятность того, что система, находившаяся в момент t в состоянии S_i , за время Δt перейдет из него в состояние S_j (плотность вероятности перехода определяется только для $j \neq i$). При малом Δt вероятность перехода $P_{ij}(\Delta t)$ (с точностью до бесконечно малых высших порядков) равна $\lambda_{ij} \Delta t$:

Имея данные по плотностям вероятностей перехода λ_{ij} , можем рассчитать вероятности всех состояний системы в разные моменты времени, т. е. определить вероятность первого состояния $P_1(t)$, второго $P_2(t)$ и т. д. Эти вероятности определяются из системы дифференциальных уравнений А.Н. Колмогорова, которые строятся по следующему правилу:

- в левой части уравнения помещается производная вероятности соответствующего состояния, например, dP_1/dt ;
- правая часть содержит столько членов, сколько стрелок связано с данным состоянием;
- каждый член правой части уравнения равен произведению плотности вероятностей перехода, соответствующей данной стрелке, на вероятность того состояния, из которого исходит стрелка;
- если стрелка направлена из состояния, соответствующий член правой части имеет знак «минус»; если в состояние – знак «плюс».

Например, для приведённого графа записывается следующая система уравнений:

$$\frac{dP_1}{dt} = -(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14}) \cdot P_1 + \lambda_{21} \cdot P_2 + \lambda_{41} \cdot P_4 \quad (1.26)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \lambda_{12} \cdot P_1 + \lambda_{32} \cdot P_3 - \lambda_{21} \cdot P_2 \quad (1.27)$$

$$\frac{dP_3}{dt} = \lambda_{13} \cdot P_1 - (\lambda_{32} + \lambda_{34}) \cdot P_3 \quad (1.28)$$

$$\frac{dP_4}{dt} = \lambda_{14} \cdot P_1 + \lambda_{34} \cdot P_3 - \lambda_{41} \cdot P_4 \quad (1.29)$$

Так называемые финальные (или предельные) состояния (при $t \rightarrow \infty$) определяются из приведенной системы уравнений, у которых левые части приравняются нулю, и нормировочного условия $P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1$. Эти финальные вероятности характеризуют среднее время пребывания системы в соответствующих состояниях S_1, S_2, S_3, S_4 .

Выводы по первой главе

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 производства к отечественной составляет 85% на 15% соответственно. Проведён анализ по ресурсооружённости парка наземной техники аэропортов МАУ, показано, что для выполнения задач по осуществлению работы аэропортового комплекса в соответствии с нормами, утверждёнными агентством воздушного транспорта аэропорты недостаточно оснащены специальной автомобильной техникой для выполнения предельно-возможных нагрузок на инфраструктуру, соответствующих прогнозируемым на 10 лет.

2. Выявлена роль технического обслуживания и ремонта специальной автомобильной техники, обслуживающих ВС в аэропортах МАУ. Установлено, что для обслуживания импортной техники в аэропортах МАУ требуются запасные части, требующие содержания сложных цепочек поставок по всему миру. Доставка данных деталей требует большего времени, что затрудняет процесс ремонта и создаёт неэффективное время простоя автомобилей в ремонте за счёт необходимости в ожидании прибытия запасных частей.

3. Выявлена основная номенклатура деталей, узлов и агрегатов, которые подвержены замене, составлен перечень часто встречающихся отказов парка

наземной техники, позволяющий создать универсальную базу по контролю за техническим состоянием техники.

4. 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.

5. Проанализированы методы, позволяющие оценить вероятность состояние системы надёжности и отказов в работе агрегатов специальной автомобильной техники. Изучены возможности определения вероятности отказов, интенсивности потока отказов и плотность потока отказов.

2 ТРЕБОВАНИЯ К КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЕ СНАБЖЕНИЯ АЭРОПОРТОВ ЗАПАСНЫМИ ЧАСТЯМИ

2.1 Оценка жизненного цикла детали агрегатов специальной автомобильной техники, эксплуатируемой в аэропортах

Ежегодно 3 ... 8% транспортной техники в мире выходят из эксплуатации и утилизируются. Средний возраст отслуживших автомобилей связан с надежностью технических средств, уровнем проведения технического обслуживания и текущего ремонта, качеством горюче-смазочных материалов, экономическими показателями благосостояния населения страны и другими факторами. Например, в Нидерландах средний возраст утилизируемых автомобилей составляет 16 лет. В России около 50% автомобилей старше 10 лет, что является аргументом при прогнозировании дальнейшего роста численности выхода автомобилей из эксплуатации [47].

Жизненный цикл машин и оборудования включает в себя эксплуатацию, состоящую из этапов транспортирования к месту их базирования, приемку, монтаж, пуск, обкатку, регулирование. В процессе эксплуатации техника подвергается диагностированию, техническому обслуживанию и ремонту. Также может возникнуть необходимость ее хранения и консервирования. Завершающим этапом эксплуатации машин и оборудования является их утилизация.

В работе «Система жизненного цикла запасных частей подвижного состава» анализируется перспектива внедрения системы повторного использования компонентов и агрегатов подвижного состава с помощью технологий восстановления [79]. Продемонстрированы технико-экономические обоснования и построение систем восстановления деталей.

Описано, что разные детали, агрегаты, узлы имеют, как правило, свои жизненные циклы изделий, которые состоят из следующих этапов (идея, исследование практик, проектирование изделия, планирование производства, закупка сырья (материалов), производство, контроль, хранение, упаковка, реализация, установка, обслуживание и поддержка, переработка, утилизация).

Корректное построение жизненного цикла для технического изделия позволит оптимизировать затраты и спланировать процессы технического обслуживания и ремонта техники.

С точки зрения экономии ресурсов и трудозатрат, система повторного использования деталей становится все более популярной, так как она представляет собой весьма эффективный способ сбережения.

В условиях современного развития экономики России становятся все более востребованными высококвалифицированные специалисты в области предоставления услуг технического сервиса, выполнения работ по диагностике, техническому обслуживанию, ремонту машин, внедрения и продвижения инновационных разработок и решений в технологическом процессе эксплуатации техники. Основой развития современных конкурентоспособных сервисных производственных и эксплуатационных предприятий являются эффективные технологии обслуживания, современное оборудование, качественное сырье, высококвалифицированный персонал.

Жизненный цикл любого изделия подразумевает под собой совокупность процессов, последовательно изменяющихся и составляющих состояние изделия и формирующихся от требований к нему, до момента окончания эксплуатации и снятия с хранения или применения

Жизненный цикл машины можно разделить на этапы, стадии и операции.

Существует четыре этапа «цикла жизни» машины: создание; перемещение (поставка, монтаж); использование; ликвидация. На каждом из названных этапов машина должна удовлетворять определенным требованиям, то есть иметь определенные свойства. Количество и продолжительность стадий, на которые делятся этапы «жизни» машины, зависят от уровня ее сложности, оригинальности конструкции, способа производства и требований заказчика. Общая ценность машины определяется главным образом на стадии конструирования.

Жизненный цикл, как правило, включает следующие основные стадии (или формы):

1. Формирование требований к машине и разработка технического задания (ТЗ).
2. Проектирование машины.
3. Изготовление, испытания и доводка опытного образца машины.
4. Серийное производство машины.
5. Эксплуатация и целевое использование машины.
6. Ремонт машины.
7. Уничтожение (утилизация) машины.

С развитием техники повышается технический уровень машин, изменяются выполняемые ими функции и совершенствуются принципы их конструирования. С точки зрения морального износа машина имеет определенные «циклы жизни» в сферах производства и эксплуатации, что оказывает влияние на ее рентабельность (достигнутую прибыль). С появлением новой конкурентоспособной машины сбыт быстро растет, достигает максимума и по мере насыщения потребительского рынка начинает сокращаться. Аналогично изменяется прибыль предприятия-производителя. Максимумы кривых сбыта и прибыли, как правило, не совпадают во времени вследствие инерции производства. В сфере эксплуатации типовой «жизненный цикл» машины определяется разницей между прибылью, которая образуется у потребителя, и эксплуатационными затратами [80].

Исследуя жизненный цикл запасной части, можно выделить несколько физических этапов с точки зрения эксплуатации детали (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Жизненный цикл деталей в рамках предприятий, эксплуатирующих специальную автомобильную технику в аэропортах

1. Приобретения детали – 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 техники, из-за чего автотранспортное средство нуждается в ремонте и замене агрегатов.
4. Установка детали взамен отработавшей – момент времени, когда техника, 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 списывается и больше не содержится на предприятии.

Время между описанными моментами 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 – время, 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 восстановления работоспособности автотранспортного средства, включает в себя диагностику с выявлением причины отказа техники, её 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. Как было описано в главе 1 при ликвидации времени хранения, заказывая запасные части в момент возникновения потребности, наблюдается жизненный цикл на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Жизненный цикл деталей при закупке после возникновения потребности в запасных частях на предприятиях, эксплуатирующих специальную автомобильную технику в аэропортах

Время простоя детали стремится к нулю, так как техническая служба заинтересована в мгновенной установке требуемых частей на неработоспособное транспортное средство, однако время простоя техники при данном сценарии разделяется на несколько составляющих:

$$T_{\Pi} = t_1 + t_2 + t_3 \quad (2.1)$$

где, t_1 – время выявления причины отказа специальной автомобильной техники;
 t_2 – время доставки потребных запасных частей на предприятие;
 t_3 – время ремонта.

Как было выявлено ранее время простоя целого транспортного средства приносит большие убытки, чем простой запасных частей на хранении, следовательно, вариант жизненного цикла на рисунке 2.1 более выгодный, так как включает в себя только время ремонта. Оценка реальных убытков кроется в значении времени хранения запасных частей.

Характеристики потоков замен деталей изменяются в каждом последующем межремонтном цикле работы машины. Поэтому нужно иметь в первом приближении информацию о числе ремонтных циклов за полный срок T_c службы машины до списания последней. Это число – Π' ремонтных циклов определяется по формуле:

$$\Pi' = \frac{8760 \cdot T_c \cdot K_{и.г.}}{T_{с.р.1к}} \quad (2.2)$$

где, T_c – средний срок службы машины до ее списания, год;

$K_{и.г.}$ – коэффициент использования машины в течение года;

$T_{с.р.1к}$ – средний ресурс работы машины до первого капитального ремонта.

Коэффициент использования машины в течение года в общем случае определяется выражением:

$$K_{и.г.} = \frac{N_d}{365} \quad (2.3)$$

где, N_d – число рабочих дней в году.

Среднее число замен с 3_{cj} -й детали в каждом ремонтном цикле вычисляют по неокругленным значениям по формуле:

$$3_{cj}' = \frac{3_{j+1}}{\Pi'} \quad (2.4)$$

Если с. $3_j < 1$, то срок службы j -й детали до ее первой замены будет превышать продолжительность первого межремонтного цикла, и поэтому поток замен таких деталей определяется выражением:

$$t_j^{(f_i)} = t_j^{(1)} \cdot f_i \cdot C^{f_j-1} \quad (2.5)$$

Это выражение учитывает сокращение сроков замен деталей j-го наименования, а не ремонтных циклов.

Таким образом, осуществляется первый этап определения потребности запасных частей, который предусматривает выявление моментов замен деталей в шкале календарного времени эксплуатации машины.

При определении ежегодной потребности в запасных деталях нужно учитывать не только средние значения периодов замен, но и характеристику разброса значений возможных замен по отношению средних периодов. Поэтому величины $\sigma_j^{(f_i)}$ среднего квадратичного отклонения продолжительности работы машины до каждой очередной замены j-й детали определяют по формуле:

$$\sigma_j^{(f_i)} = \sigma_j^{(1)} \cdot \sqrt{f_j} \quad (2.6)$$

где, $\sigma_j^{(1)}$ – получают на основании статистической информации о продолжительности работы машины до первой замены данной детали.

Ежегодную потребность в запасных деталях j-го наименования для одной машины определяют с учетом возможного распределения срока замены j-й детали. Вследствие многофакторного влияния на сроки постановки машины в ремонт для замены данной детали можно считать, что наиболее обоснованным является нормальное распределение этих сроков. Таким образом, ежегодную потребность в запасных деталях (в долях единицы) можно определить путем интегрирования кривой распределения срока очередной замены j-й детали в пределах t-го года эксплуатации машины по формуле:

$$\Delta\Phi_{m,j}^{(f_j)} = \frac{1}{\sigma_j^{(f_j)} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_m^m e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-t_j^{(f_j)}}{\sigma_j^{(f_j)}} \right)^2} dt \quad (2.7)$$

где величина $\frac{t-t_j^{(f_j)}}{\sigma_j^{(f_j)}}$ представляет собой квантиль нормированной случайной величины t (срока службы детали до очередной замены).

Ежегодную потребность для одной машины (в долях единицы) в j -й детали по всем номерам замен в пределах m -го года эксплуатации машины определяют суммой по всем заменам:

$$\Delta\Phi_{m,j} = \sum_{f_j=1}^{3_j} \Delta\Phi_{m,j}^{(f_j)} \quad (2.8)$$

Потребность (по массе, стоимости) в заменяемых деталях j -го наименования на одну машину в m -ном году ее эксплуатации определяется выражением:

$$g_{m,j} = \omega_j \cdot n_{3_j} \cdot \Delta\Phi_{m,j} \quad (2.9)$$

где ω_j – цена j -й детали, руб;

$3_j n$ – число одновременно заменяемых деталей j -го тип номинала.

Данная методика позволяет формировать поток замен деталей/выходящих из строя, определять ежегодную потребность в запасных частях на одну машину [81-89].

2.2 Концепция логистического снабжения «точно в срок» для потока замен запасных частей специальной автомобильной техники аэропортов

В работе «Оптимизация технического обслуживания автомобилей (на примере аэродромных машин) с использованием основ логистических принципов доставки запасных частей» [90] анализируются вопросы транспортного обеспечения и технического обслуживания специализированной аэродромной техники на автомобильном шасси, а также рассматриваются наработки на отказ отдельных транспортных средств и эффективность использования транспортного парка. Также была представлена схема оптимальной реализации логистических процессов.

При разработке графиков обслуживания, была выявлена важность учета ключевого аспекта — логистическая поддержка, которая включает доставку запасных частей и организацию своевременного сервиса [12,90].

В этой связи аэропортам Российской Федерации и организациям, эксплуатирующим специальную автомобильную технику аэропортов, крайне важно учитывать логистические аспекты в своей производственной деятельности на краткосрочную и долгосрочную перспективу развития [12].

В целях эффективной деятельности следует создать единый центр поставок, который объединит парк специальной автомобильной техники аэропортов и будет оперативно осуществлять координацию эксплуатантов и поставщиков запасных частей для планово-предупредительного и оперативного ремонта техники. Данный подход позволит обеспечить унификацию техники и перейти к укрупненным поставкам запасных частей, учитывая потребности каждого эксплуатанта, всё это позволит сократить финансовые издержки и ускорить процесс сервисного обслуживания [90,216].

В ранее выполненной кандидатской диссертации автора [206] была разработана методика организации поставок запасных частей для специальных автомобилей, эксплуатирующихся в аэропортах, изучен подход предприятий, обеспечивающих обслуживание специальной автомобильной техники аэропортов Московского авиационного узла, с учётом функционирования единого центра поставок, требований стандартов и контролирующих организаций. Отдельные результаты данного исследования опубликованы автором в работе [91].

Методика организации поставок запасных частей для специальной автомобильной техники в аэропортах предполагает использование единого центра поставок (ЕЦП). Запасные части поступают в ЕЦП, где возможны два варианта их реализации:

1. Грузы помещаются в фонд формирования заказов как запас, затем доставляются потребителю на автомобилях. Применяется метод «поставка — склад — автомобиль — потребитель».

2. Грузы загружаются непосредственно из ежеинтервального оборотного фонда на автомобили для дальнейшей доставки заказчиком, что называется «поставка — автомобиль — потребитель». Этот вариант часто оказывается более эффективным для обслуживания клиентов [91, 216].

Таким образом, необходимо определить соотношение между двумя вариантами поставки и необходимым количеством транспортных средств для выполнения заданного объема перевозок. При моделировании процесса обработки грузов на ЕЦП следует рассчитывать соответствующие показатели с периодом интервалов 24 часа и годом в 365 дней [91, 216].

Было решено, что создание системы интегрированной логистической поддержки (ИЛП) через Единый Центр Поставок (ЕЦП) для управления поставками запасных частей для наземной техники аэропортов Московского авиационного узла позволит уменьшить время ожидания поставок для эксплуатантов. Разработана научная методика для решения задач ИЛП в области управления материально-техническим обеспечением специальной автомобильной техники МАУ, особенно для техники иностранного производства. Такой способ организации снабжения позволяет оптимизировать затраты эксплуатантов во времени и стоимости перевозок запасных частей [91, 216].

Концепция «Точно-в-срок» (Just-in-time) - самый известный в мире подход, применение которого при обеспечении запасными частями специальной автомобильной техники аэропортов позволит минимизировать уровень запасов на складах и позволит обеспечить наличие необходимых деталей с минимальными издержками. В общемировой практике реализация данного подхода возможна как отдельными организациями для собственных производственных мощностей, так и через иную организацию (единый центр поставок), который позволяет за счёт объёма закупок давать лучшие экономические и временные результаты.

При изучении реализации данного подхода определено, что успех производственной деятельности зависит от наличия унифицированной информационной базы, как правило CRM-системы, в которой все процессы связаны друг с другом, выполняются синхронно и общедоступны всем участникам

производственной цепи, данная деятельность позволяет минимизировать или вовсе исключить время на хранение материальных объектов на складах.

Главным элементом в данном подходе является время конкретного действия от участника производственной цепи, так как от времени отклика зависит последующее действие контрагента, закупка сырья, запуск производства, обеспечение транспортом, прием-передача материальных ценностей, ремонтные работы и др.

В научной литературе указано, что внедрение и апробация концепции «Точно-в-срок» происходило в Японии в середине XX века, так как после завершения Второй мировой войны Япония была ограничена во многих ресурсах и искала способы оптимизации по всех отраслях экономики, в том числе и в области транспорта, логистики и производства. Именно эти обстоятельства стимулировали создание системы, которая сводит к минимуму ненужные затраты и делает производство максимально гибким.

Цели Just-In-Time направлены на устранение источников потерь: перепроизводства, дефектов, лишних операций, длительных переналадок и простоев. Кроме того, сокращение времени переналадки оборудования играет важную роль: оно позволяет производить малыми партиями, адаптируясь к изменяющимся заказам клиентов. Работа по минимизации этого времени включает разделение задач на те, которые можно выполнять при работающем оборудовании (например, подготовку инструментов), и те, что требуют остановки линии.

Наконец, эффективная синхронизация всех этапов поставок и производства возможна при наличии надежных партнеров. Поставщики должны обеспечивать частые доставки небольших партий сырья и материалов. Это требует высокой координации и доверия в цепочке поставок — на мой взгляд, именно такие условия делают Just-In-Time мощной стратегией для современного производства.

Сравнение концепции «точно в срок» и традиционного менеджмента запасов приведено в таблице 2.1

Таблица 2.1 – Сравнение различных логистических концепций

Фактор	Концепция «точно в срок»	Традиционный подход
Запасы	Включаются в пассивы. Все усилия должны быть направлены на их устранение. Страховые запасы отсутствуют	Включаются в активы. Защищают производство от ошибок прогнозирования и ненадежности поставщиков. Большинство запасов – страховые
Размер запаса, объем закупок материальных ресурсов	Размер запаса показывает только текущую потребность. Минимальный объем материальных ресурсов в поставке определяется как для производителя, так и для поставщика. Для определения объема поставки используется формула наиболее экономичного размера заказа	Размер запаса определяется, исходя из соображений экономии или по формуле наиболее экономичного размера заказа. Не учитывается изменение размера запаса при изменении затрат в сбыте при сокращении выпуска продукции и поставок материальных ресурсов
Сбыт	Имеет приоритетное значение. Отслеживание изменений спроса, в соответствии с которыми осуществляется оперативная переналадка оборудования. Стремление к производству небольших партий готовой продукции	Не имеет приоритетного значения. Обычная цель – максимизация объема выпуска готовой продукции
Запасы незавершенного производства	Устранение запасов незавершенного производства – важная задача. Если имеются	Необходимый элемент производственной системы. Запасы незавершенного

	небольшие запасы между производственными подразделениями, необходимо их фиксировать и оперативно устранить	производства аккумулируются между структурными подразделениями, являясь основой обеспечения бесперебойности производственно-технологических циклов
Поставщики	Рассматриваются как партнеры по производству. Отношения только с надежными поставщиками. Небольшое число поставщиков	Поддерживаются длительные деловые отношения с поставщиками. Как правило, большое число поставщиков, между которыми искусственно поддерживается конкуренция
Качество продукции	Цель – отсутствие дефектов продукции. Если качество обеспечивается не на 100%, то производство и дистрибьюция недостаточно эффективны. Идеология всеобщего управления качеством	Допускается небольшое число дефектов. Выборочные инспекции качества готовой продукции
Поддержка технологическим оборудованием	Предварительная поддержка существенна. Производственный процесс может быть прерван, если поддержка не обеспечивает непрерывность и своевременность доставки	Оказывается по мере необходимости. Сбои не возникают, пока запасы поддерживаются на необходимом уровне

	материальных ресурсов и запасов незавершенного производства	
Длительность производственного периода	Поддерживается на минимально возможном уровне. При этом возрастает скорость реакции снабженческих каналов на изменения спроса и уменьшается неопределенность, связанная с прогнозом потребности в продукции	Охватывает большой временной интервал. Нет потребности в ее уменьшении, пока поддерживаются значительные страховые запасы
Персонал	Необходима согласованность действий как рабочего, так и управленческого персонала. Нельзя вносить изменения в логистический процесс, пока нет согласованности действий персонала	Управление осуществляет общий менеджмент. Изменения не зависят от нижних звеньев управленческого персонала

Логистические системы, использующие принципы концепции «точно в срок», являются «тянущими» системами (pull systems), в которых размещение заказов на пополнение запасов материальных ресурсов или готовой продукции происходит, когда количество их в определенных звеньях логистической системы достигает критического уровня. При этом запасы «вытягиваются» по распределительным каналам от поставщиков материальных ресурсов или логистических посредников в системе дистрибуции. В концепции «точно в срок» существенную роль играет спрос, определяющий дальнейшее движение сырья, материалов, компонентов, полуфабрикатов и готовой продукции. Короткие составляющие логистических циклов в системах, применяющих данный подход, способствуют концентрации основных поставщиков материальных ресурсов

вблизи главной фирмы, осуществляющей процесс производства или сборки готовой продукции. Фирма старается выбрать небольшое число поставщиков, отличающихся высокой степенью надежности поставок, так как любой сбой в поставках может нарушить производственное расписание. О том, насколько важна надежность поставщиков, говорит тот факт, что американские и европейские производители смогли внедрить концепцию «точно в срок» только через 10–15 лет после японцев в основном из-за низкой надежности поставок. В соответствии с этой концепцией поставщики становятся, по существу, партнерами производителей готовой продукции в их бизнесе.

Современные технологии ЛТ и логистические системы стали более интегрированными и комбинируются из различных вариантов логистических производственных концепций и распределительных систем, таких, как системы, минимизирующие запасы в логистических каналах, логистические системы быстрого переключения выравнивания уровня запасов, групповые технологии, превентивное гибкое автоматизированное производство, современные логистические системы всеобщего статистического контроля и управления циклами качества продукции и т.п. Поэтому в настоящее время принято относить такие технологии к новой версии концепции «точно в срок» – концепции ЛТ II [115].

Основной целью логистической концепции ЛТ II является максимальная интеграция всех логистических функций фирмы для минимизации уровня запасов в интегрированной логистической системе, обеспечение высокой надежности и уровня качества продукции и сервиса для максимального удовлетворения запросов потребителей. Системы, основанные на идеологии ЛТ II, используют гибкие производственные технологии выпуска небольших объемов готовой продукции группового ассортимента на базе раннего предсказания покупательского спроса.

Для эффективного внедрения концепции «точно в срок» для снабжения запасными частями аэропортов МАУ требуется решение задачи определения момента во времени предварительной потребности в запасных частях. Так как сущность отказов носит вероятностный характер, прогнозирование отказов

является сложной математической задачей, для решения которой требуется разработка алгоритма предупреждения отказов с учётом текущей достоверно известной наработки и состояния агрегатов специальной автомобильной техники на некоторое время вперёд, требуемое для организации доставки потребных запасных частей.

Так как закупка отдельных компонентов несёт в себе мелко партийный характер данную систему можно представить в виде моделирования состояния каждого критического элемента специальной автомобильной техники, замена которого возможна для продолжения функционирования транспортного средства.

В работе предлагается использовать имитационную модель наработки узлов и агрегатов специальной автомобильной техники, доставка которых на производство требует достаточно большего времени, и без которых транспортные средства не смогут выполнять работу и вынуждены ожидать прибытия потребных частей [206].

В научной работе «Организация поставок комплектующих и запасных частей к специализированным автомобилям, эксплуатирующихся в аэропортах Арктического региона» были рассмотрены подходы к осуществлению поставок в условиях Крайнего Севера с использованием единого центра, исходя из специфики работы авиапредприятий и требований, предъявляемых к качеству услуг в данной отрасли.

При анализе этого вопроса были проведены расчеты грузоподъемности специализированных автомобилей, а также обращено внимание на организацию хранения комплектующих и запасных частей, включая планирование их транспортировки.

Модель, предложенная автором, связана с логистическим подходом «Just In Time». Суть этого подхода заключается в том, что при строго установленном производственном расписании можно организовать материальные потоки так, чтобы все детали и комплектующие поступали в нужные службы точно в назначенное время и в срок производства, при этом минимизируя запасы на производстве.

Создание единой централизованной платформы для управления поставками запасных частей для эксплуатантов наземной техники аэропортов в Арктическом регионе позволит сократить время ожидания запасных частей [91,216]. Таким образом, разработана научная методика для решения проблемы интегрированного логистического процесса комплексного управления материально-техническим обеспечением специальной автомобильной техники, особенно иностранного производства. Данный подход, внедряющий централизованную структуру снабжения, способствует снижению высоких затрат, связанных с организацией перевозок запасных частей в условиях Заполярья.

2.3 Имитационное моделирование как средство прогнозирования моментов времени потребности в запасных частях для логистической концепции «точно в срок» для снабжения специальной автомобильной техники аэропортов

Моделирование – метод решения задач, при использовании которого исследуемая система заменяется более простым объектом, описывающим реальную систему и называемым моделью. Моделирование применяется в случаях, когда проведение экспериментов над реальной системой невозможно или нецелесообразно, например, из-за высокой стоимости или длительности проведения эксперимента в реальном масштабе времени [116-140].

Моделирование – самое эффективное средство поддержки принятия решений, а по словам Ричарда Докинза – «один из самых интересных способов предсказывать будущее» [146].

В основе моделирования заложена процедура формализации – перевод свойств объекта на язык понятий предметной области, алгоритмов и математики.

Различают физическое и математическое моделирование. Примером физической модели является уменьшенная копия самолета, продуваемая в потоке воздуха. При использовании математического моделирования поведение системы описывается с помощью формул. Особым видом математических моделей являются имитационные модели.

Имитационная модель – это компьютерная программа, которая описывает структуру и воспроизводит поведение реальной системы во времени. Имитационная модель позволяет получать подробную статистику о различных аспектах функционирования системы в зависимости от входных данных. Имитационное моделирование – разработка компьютерных моделей и постановка экспериментов на них. Целью моделирования в конечном счете является принятие обоснованных, целесообразных управленческих решений; подготовка студентов к решению задач, связанных с процессами анализа, прогнозирования, моделирования в рамках профессионально ориентированных информационных систем сферы инноватики.

Имитационное моделирование при изучении сложных систем является практически основным доступным методом получения информации о поведении системы в условиях неопределенности.

Под имитационным моделированием понимается разработка модели системы в виде программы для компьютера и проведение экспериментов с программой вместо проведения экспериментов с реальной системой или объектом. Имитационное моделирование применяется, когда невозможно построить аналитическую модель системы, учитывающую причинные связи, последствия, нелинейности, стохастические переменные, когда необходимо имитировать поведение системы во времени, рассматривая различные возможные сценарии ее развития при изменении внешних и внутренних условий. Таким образом, имитационное моделирование – это высокоуровневая информационная технология с применением компьютеров, чаще всего используемая при моделировании сложных систем. Существует достаточное количество работ, рассматривающих разные подходы и точки зрения к имитационному моделированию, такие подходы изучали такие учёные, как Толуев Ю.И., Кобелев Н.Б., Половников В.А., Девятков В.В., Эльберг М.С., Строгалева В.П. [141-148].

Развитие современных программных инструментов для имитационного моделирования кардинально трансформирует подход к созданию моделей. По данным проведённого анализа, снижение барьеров для разработки позволяет

специалистам из различных областей, не обладающим глубокими программными навыками, реализовывать проекты моделирования даже для сложных систем. В этой связи имитационное моделирование становится универсальным инструментом при проведении различных исследований.

В свою очередь имитационное моделирование позволяет сформировать процессы и объект исследования на основе определенных предпосылок, однако из-за широкого применения существует риск недостоверности сформированных моделей из-за определенных факторов.

Различные направления моделирования (например, агентно-ориентированное, системная динамика) предполагают собственные методологические структуры, что требует тщательного анализа при выборе инструментов для конкретной задачи.

В современных условиях моделирование становится доступным для широкого круга исследователей, но его эффективность напрямую определяется уровнем компетенции постановщика задач и корректностью теоретических оснований разработки.



Рисунок 2.3 – Разновидности (направления) имитационного моделирования

Статистическое (численное) моделирование является разновидностью имитационного моделирования. Изначально оно появилось в теории случайных процессов и математической статистике как способ вычисления статистических характеристик случайных процессов путем многократного воспроизведения течения процесса с помощью модели этого процесса. Этот подход к исследованию реального процесса был назван методом статистических испытаний (методом Монте-Карло). Модели здесь строятся для явлений и систем объектов, входы и (или) функциональные соотношения между различными компонентами которых содержат элементы случайности или полностью случайных процессов, подчиняющиеся вероятностным законам.

Осуществление решения вероятностной модели реального объекта производится на ЭВМ. Машинная имитация позволяет исследовать модель, как в определенные моменты времени, так и в течение продолжительных периодов времени. Для нахождения устойчивых решений (характеристик) при численном статистическом моделировании требуется его многократное воспроизведение с последующей статистической обработкой. Здесь проводится имитация воздействия многочисленных случайных факторов на различные элементы модели. Каждое воздействие на процесс в модели представляется в виде «розыгрыша» случайного явления с помощью процедуры, дающей случайный результат. Множество таких реализаций в ходе одного варианта имитации дает одну реализацию (историю) процесса. Затем вычисляются средние статистические характеристики по многим историям.

Статистическое моделирование в зависимости от области применения подразделяется на несколько направлений.

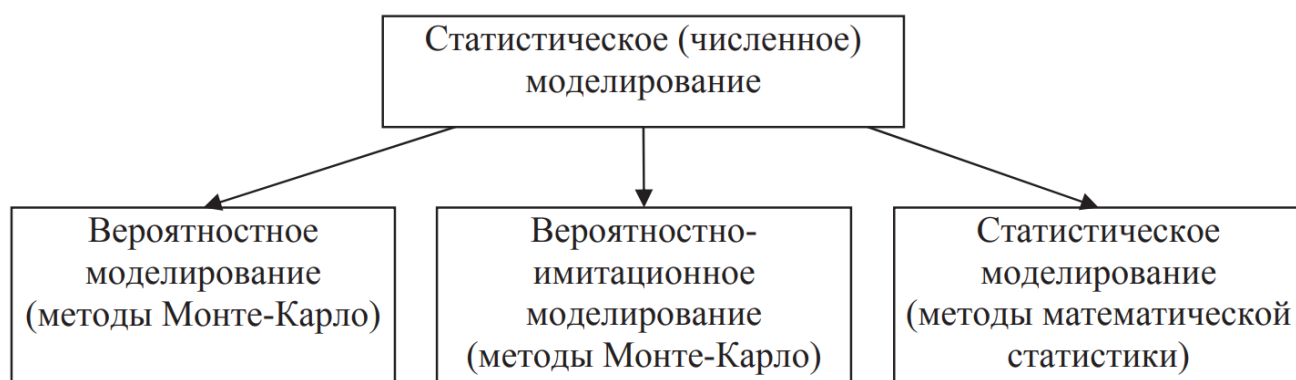


Рисунок 2.4 – Классификация видов статистического численного моделирования по типу решаемых задач

Вероятностное моделирование (методы Монте-Карло) – это направление развивается как способ решения математических задач – вычисление интегралов, решение систем линейных уравнений и дифференциальных уравнений.

Вероятностно-имитационное моделирование – применение теории вероятностей и методов Монте-Карло для построения имитационных моделей в молекулярной, статистической, квантовой, нейтронной физике, геофизике, газовой динамике, химической кинетике, в передаче и защите информации, в моделях массового обслуживания, финансовой математики, математической биологии и др.

Статистическое моделирование – применение математической статистики для статистического оценивания и прогнозирования, корреляционно-регрессионного и многомерного статистического анализа, оптимизации систем, определения экстремума функций большого числа переменных и др. в различных отраслях производства и науки.

Имитационное моделирование доказало свою успешность во многих областях применения. Появление новых методов моделирования и рост вычислительной мощности компьютеров позволяет утверждать, что количество этих областей будет только расти.

Под динамической системой будем понимать любой объект, процесс или явление, для которого однозначно определено понятие состояния как совокупности некоторых величин и задан закон, который описывает изменение начального

состояния с течением времени,двигающийся в пространстве и изменяющийся во времени. Динамическими объектами могут быть механические, производственные, физические, химические, биологические объекты, вычислительные процессы и др.

Динамические системы описываются различными способами: дифференциальными уравнениями, дискретными отображениями, марковскими цепями, графическими образами и др. Они классифицируются в зависимости от вида оператора отображения и структуры фазового пространства. Различают линейные и нелинейные, непрерывные и дискретные операторы, соответственно определяются линейные и нелинейные системы, с дискретным временем и с непрерывным временем. [149-157].

Имитационная модель представляется в виде компьютерной программы, компьютерной установки, которая описывает структуру и воспроизводит поведение реальной системы во времени. Имитационная модель позволяет получать подробную статистику о различных аспектах функционирования системы в зависимости от входных данных.

В системах компьютерной математики, технического и имитационного моделирования предусмотрены возможности создания статистических (монте-карловских) имитационных моделей (генераторы случайных чисел, генераторы случайных величин, распределений и т. д.) и компьютерных имитационных моделей сложных систем.

В работе «Комплексная ИТС технического обслуживания и обеспечения материально-технического снабжения специальных автомобилей, эксплуатируемых в аэропортах» были рассмотрены основные научные идеи и концепции открытой системы, а также подчеркивается значение ее отдельных элементов и инжиниринга в процессе развития [208]. Это необходимо для дальнейшего совершенствования методов и инноваций, которые являются основой управления сложными транспортными системами. Рост количественных показателей авиаперевозок в России и постоянное повышение требований к их регулярности и безопасности должны обеспечиваться, в том числе, своевременной поставкой запасных частей для специальной автомобильной техники,

используемых в аэропортах. С учетом морального и технического износа специальной автомобильной техники, выпущенной много лет назад, возникает необходимость обновления парка, включая иностранные автомобили. Это приводит к необходимости обеспечения разномарочной техники оригинальными агрегатами, запасными частями и комплектующими, которые можно заказать только в специализированных центрах или у дилеров производителей, обычно находящихся за пределами России. Интенсивная эксплуатация специальной автомобильной техники, часто с нарушением действующих регламентов, требует создания эффективной системы обеспечения запасными частями, так как обслуживание зарубежной техники предъявляет высокие требования к качеству запасных частей и комплектующих.

Показательное увеличение информации о технической эксплуатации специальных автомобилей аэропортов, получаемой в период использования, позволяет сделать заключение о необходимости изменения методов управления подсистемами технического обслуживания и ремонта, а также доставки запасных частей. В современных условиях, с учетом многообразия техники и навесного оборудования к ней, детерминированный подход, используемый при эксплуатации техники становится менее эффективным, чем подходы, использующие искусственный интеллект при обработке больших массивов данных об эксплуатации определенного вида техники и его регламентного обслуживания. Внедрение предиктивной аналитики обеспечивает валидацию закономерностей неисправностей техники в период эксплуатации, а также позволяет прогнозировать сроки доставки запасных частей, которые позволят снизить временной простой техники, и повысить экономическую эффективность и безопасность производственных процессов.

Современная эксплуатация специальной автомобильной техники аэропортов зависит от интеграции в информационную транспортно-логистическую систему современных телематических данных, получаемых с помощью геоинформационных и глобальных навигационных спутниковых систем. Используя данный подход, эксплуатанты смогут обеспечивать постоянный сбор

данных о техническом состоянии специальной автомобильной техники в режиме реального времени, что в свою очередь позволит обеспечить своевременную доставку запасных частей для оперативного обслуживания техники.

В настоящее время эксплуатанты техники и обслуживающие их организации применяют концепции и методы M2M, RFID, IoT, учитывающие различные параметры: пассажиропоток, количество взлетно-посадочных операций, количество единиц автомобильной техники, время и режимы эксплуатации и др. Корректный учёт параметров, влияющих на специальную автомобильную технику аэропортов, позволяет обеспечить планомерную доставку запасных частей, выбрать маршрут доставки, подготовить ремонтные зоны, привлечь, при необходимости, сервисную организацию.

Гражданские аэропорты Российской Федерации входят в категорию объектов «открытых» интегрированных транспортно-логистических систем высокого уровня сложности. Их функционирование характеризуется жесткой детерминированностью расписания и необходимостью синхронизации множества параллельных процессов. В этом контексте бесперебойная работа специализированных служб наземного обеспечения выступает критическим узлом всей инфраструктуры. Управление парком САТ в таких условиях требует интеграции технических, метеорологических и логистических подсистем в единый цифровой контур, где решения о закупке и доставке запасных частей принимаются на основе комплексного анализа операционной обстановки.

Таким образом, управление потоками в сложных транспортных системах требует интеграции современных научных подходов и новейших технологий. В настоящее время исследователи сосредоточены на методах искусственного интеллекта и машинного обучения, которые способны в реальном времени анализировать большие объемы данных о движении транспорта, предсказывать загрузку объектов и оптимизировать маршруты как для частных пользователей, так и для компаний, занимающихся перевозкой грузов (например, запасных частей) наземным или воздушным транспортом. Ключевым параметром оптимизации является количество транспортных средств, задействованных в перевозках. В

результате расчетов можно получить зависимость изменения затрат от числа привлеченных транспортных средств. В данном случае минимизация общих затрат будет соответствовать оптимальному количеству автомобилей, необходимых для вывоза поступающих запасных частей. Этот подход, реализующий централизованную структуру снабжения, позволяет снизить высокие издержки, связанные со сложностью организации перевозок запасных частей.

Выводы по второй главе

1. Рассмотрены методы определения вероятности безотказной работы и отказа деталей в различных условиях эксплуатации. Установлено, что при идеальных условиях все детали изнашиваются одновременно, но на практике это не так, что существенно влияет на процесс определения момента необходимости закупки запасных частей. Выявлена роль технического обслуживания и ремонта специальной автомобильной техники, обслуживающей различные процессы в аэропортах МАУ. Установлено, что для обслуживания импортной техники в аэропортах МАУ требуются запасные части, требующие содержания сложных цепочек поставок по всему миру. Доставка данных деталей требует большего времени, что затрудняет процесс ремонта и создаёт неэффективное время простоя автомобилей в ремонте за счёт необходимости в ожидании прибытия запасных частей.

2. Рассмотрена зона работоспособности (ЗР), зона отказов (ЗО) и зона упреждения отказов (ЗУ) автомобиля как сложной системы. Установлено, что автомобиль представляет собой совокупность действующих элементов – сборочных единиц и деталей, которые обеспечивают выполнение его функций. Это подчеркивает необходимость комплексного подхода к определению вероятности отказа в такой системе.

3. Приведен обзор концепций управления запасами и производством, с акцентом на концепцию «точно в срок» – JIT. Основная цель данной концепции заключается в максимальной интеграции всех логистических функций предприятия для минимизации уровней запасов в системе, обеспечения высокой

надежности и качества продукции и сервиса, а также максимального удовлетворения потребностей клиентов. Системы, базирующиеся на идеологии JIT, используют гибкие производственные технологии для выпуска небольших партий готовой продукции с широким ассортиментом на основе раннего прогнозирования.

4. Описаны различные подходы к имитационному моделированию с акцентированием внимания на статистическом (численном) моделировании как одной из разновидностей. В рамках логистической концепции «точно в срок» (JIT), имитационное моделирование выступает мощным инструментом прогнозирования моментов времени потребности в запасных частях для снабжения специальной автотранспортной техники в аэропортах. Имитационное моделирование позволяет исследовать сложные системы и процессы, обеспечивая более точное планирование и сокращение затрат на организацию поставок

3 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МОМЕНТОВ ВРЕМЕНИ ПОТРЕБНОСТИ В ЗАПАСНЫХ ЧАСТЯХ

3.1 Требования к имитационной модели прогнозирования отказа узлов специальной автомобильной техники аэропортов

В работе предлагается использование модели имитации наработки узлов МАУ, для ремонта и замены которых требуется длительная доставка запасных частей. Концептуальная схема работы такого алгоритма приведена на рисунке 3.1. Исходными данными для модели служат данные о диагностике и техническому обслуживанию транспортных средств. Исходя из данных наработки и корректировки данных диагностики предлагается использование функции вероятности отказа узла агрегата специальной автомобильной техники. При достижении установленных предельных значений вероятности отказа выходным параметром модели является момент времени, в который значение превышает предельно-допустимое. Данный момент времени согласно концепции «точно в срок» запасные части для ремонта должны быть на балансе производства. Соответственно имея данные о моменте превышения допуска, логистическая система аэропорта может осуществить доставку к заданному сроку чтобы обеспечить минимальные сроки хранения детали в запасе так же, как и минимизировать время простоя автотранспортного средства из-за ожидания прибытия запасных частей [158-165].

Алгоритм работы имитационной модели прогнозирования отказа узлов специальных транспортных средств включает в себя следующие этапы:

1. Вход исходных данных:
2. Данные о диагностике и техническом обслуживании транспортных средств.
3. Данные о наработке узлов агрегатов специальной автомобильной техники.

4. Определение функции вероятности отказа узла агрегата специальной автомобильной техники на основе данных наработки и корректировки диагностических данных.

5. Установка предельных значений вероятности отказа для каждого узла агрегата специальной автомобильной техники.

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

7. 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.

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

9. Определение параметров удельных затрат на использованные запасные части при ремонте, отнесенных к количеству обслуженных автомобилей, без учета затрат на сам ремонт.

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

Работа модели 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 объёма данных, отсутствия информации о надёжности изделия от завода–изготовителя и/или поставщика, высокой доли влияния условий работы и эксплуатации и т.п. Для решения этой проблемы предлагается разработка

усреднённого закона распределения вероятности отказа узла в зависимости от текущей наработки и максимального ресурса [206]. В общем виде закон имеет вид (3.1)

$$p_{\text{отк}} = f\left(\frac{E}{E_{\text{max}}}\right) = f(K). \quad (3.1)$$

где $p_{\text{отк}}$ – вероятность отказа узла или агрегата;

E – текущая наработка;

E_{max} – максимальный ресурс;

K – процент выработки ресурса.

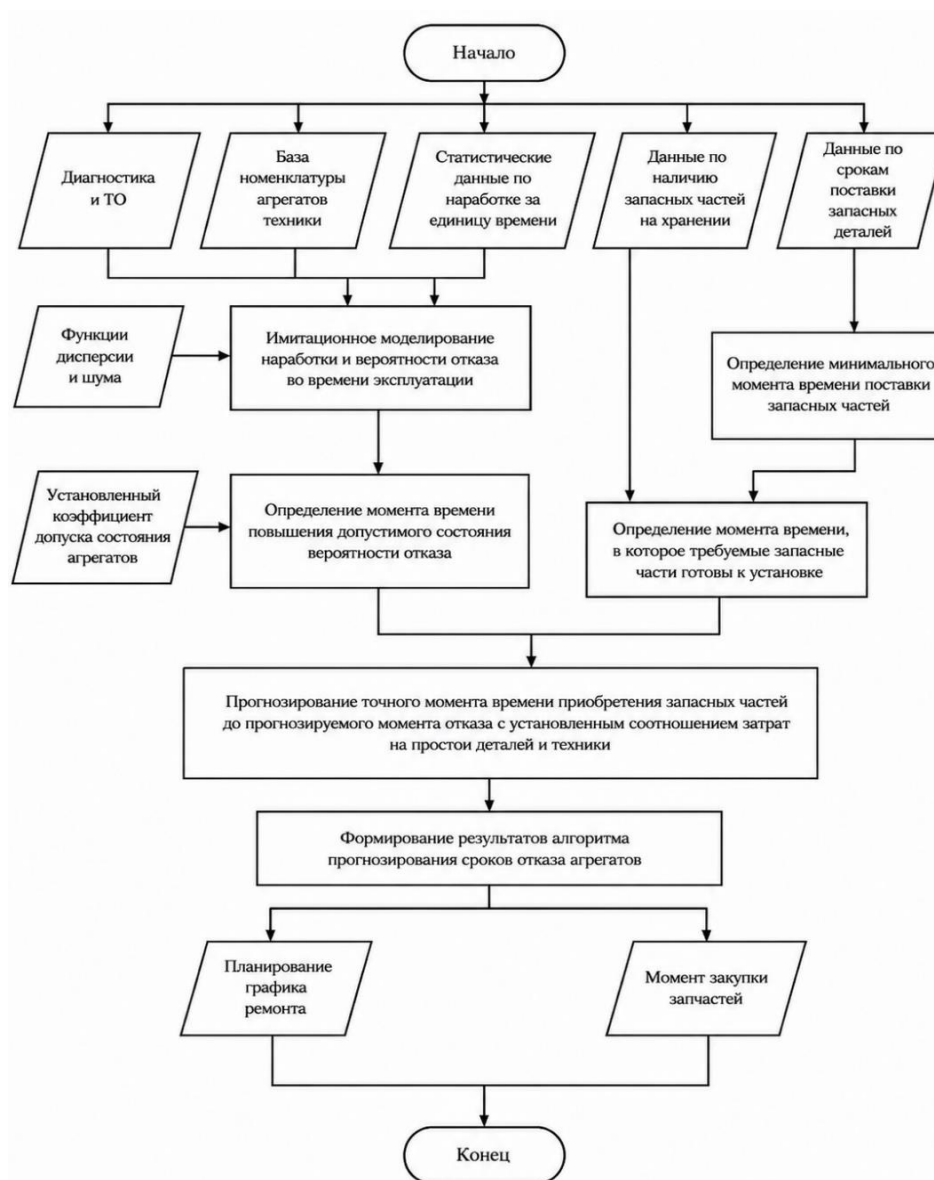


Рисунок 3.1 – Схема прогнозирования моментов отказа агрегатов специальной автомобильной техники

Создание такого распределения требует учёта множества данных о моментах отказа деталей по всей технике автопарков. Так как величина максимального ресурса зачастую устанавливается как величина гарантированной работы узла она не может сопоставляться со значением 100% вероятности отказа.

Ежедневное моделирование так же 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 вероятности такое распределение зачастую имеет нормальный характер и может быть описана гауссовским распределением.

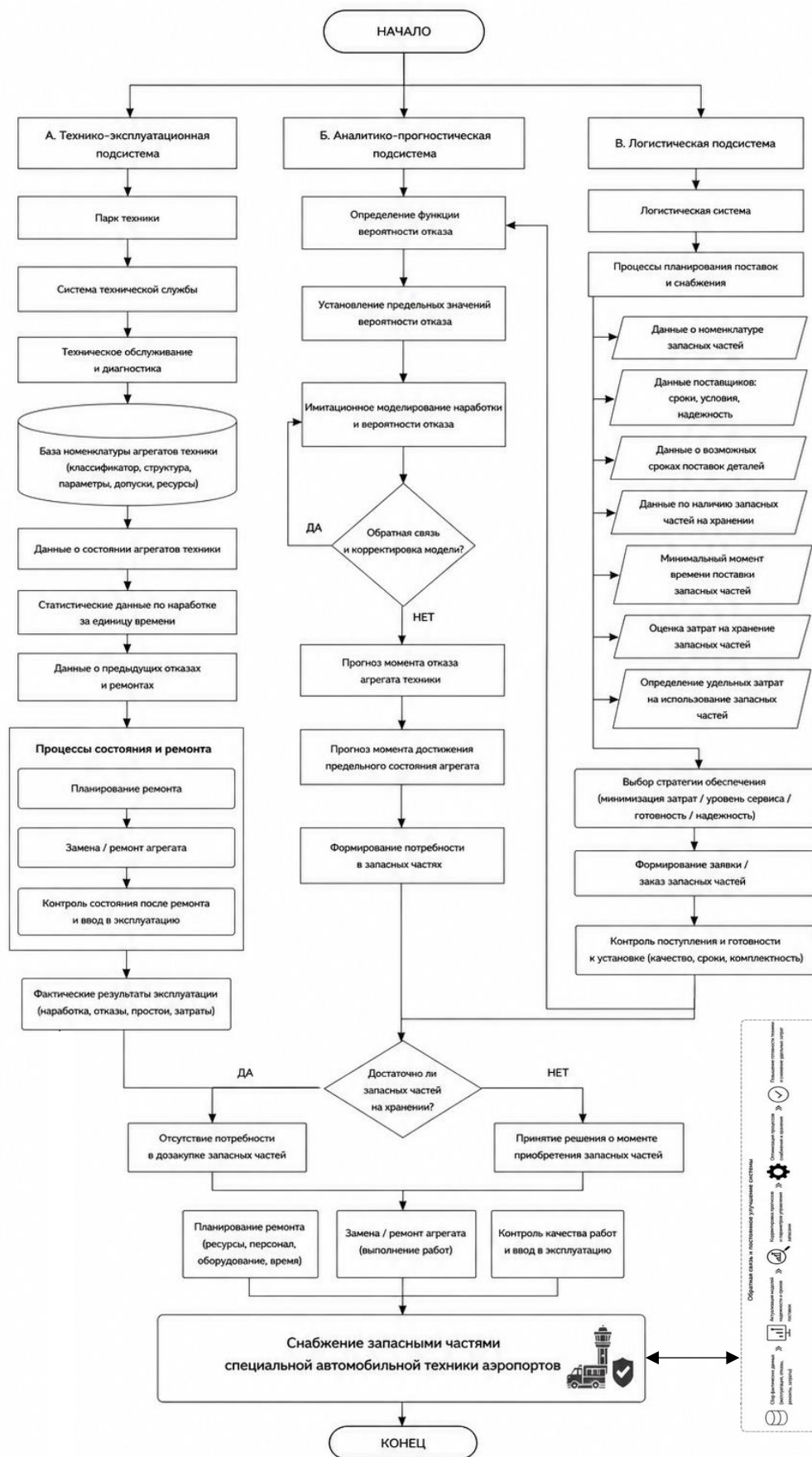


Рисунок 3.2 – Алгоритм работы системы снабжения специальной автомобильной техники аэропортов на примере Московского авиационного узла

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 автомобилей, выполняющих гидравлическую работу по подъёму и опусканию других технических средств или пассажиров, таких как трапы, автокраны и т.д. 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.

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 неоптимально 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 большего 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 приближённым к средней, но пессимистичному подходу ввиду превосходства потерь от простоя всего транспортного средства над простоем отдельных запасных частей.

Алгоритм должен предоставлять информацию о возможности выбора отдельных дат закупки запасных частей для обеспечения 100%, 75%, 50% и пр. вероятности прибытия потребных деталей в срок. Для получения данной информации предлагается многократный повтор имитации в размере от 100 до 1000 итераций для сбора множества данных работы моделирования и анализа всех результатов работы алгоритма. Крайние экстремальные значения могут выравниваться методами исключения ошибок и сглаживания кривой [166-171].

3.2 Анализ зависимости вероятности отказа агрегата от отношения текущей наработки к назначенному ресурсу

Согласно ГОСТ 27.002-2015:

Наработка – продолжительность или объем работы объекта.

Ресурс – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до момента достижения предельного состояния

Назначенный ресурс – суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация объекта может быть продолжена только после принятия решения о возможности продления данного показателя

Средний ресурс – математическое ожидание ресурса.

Назначенный ресурс зачастую устанавливается заводом изготовителем для каждого элемента и зачастую занижен на определённое значение, гарантирующее

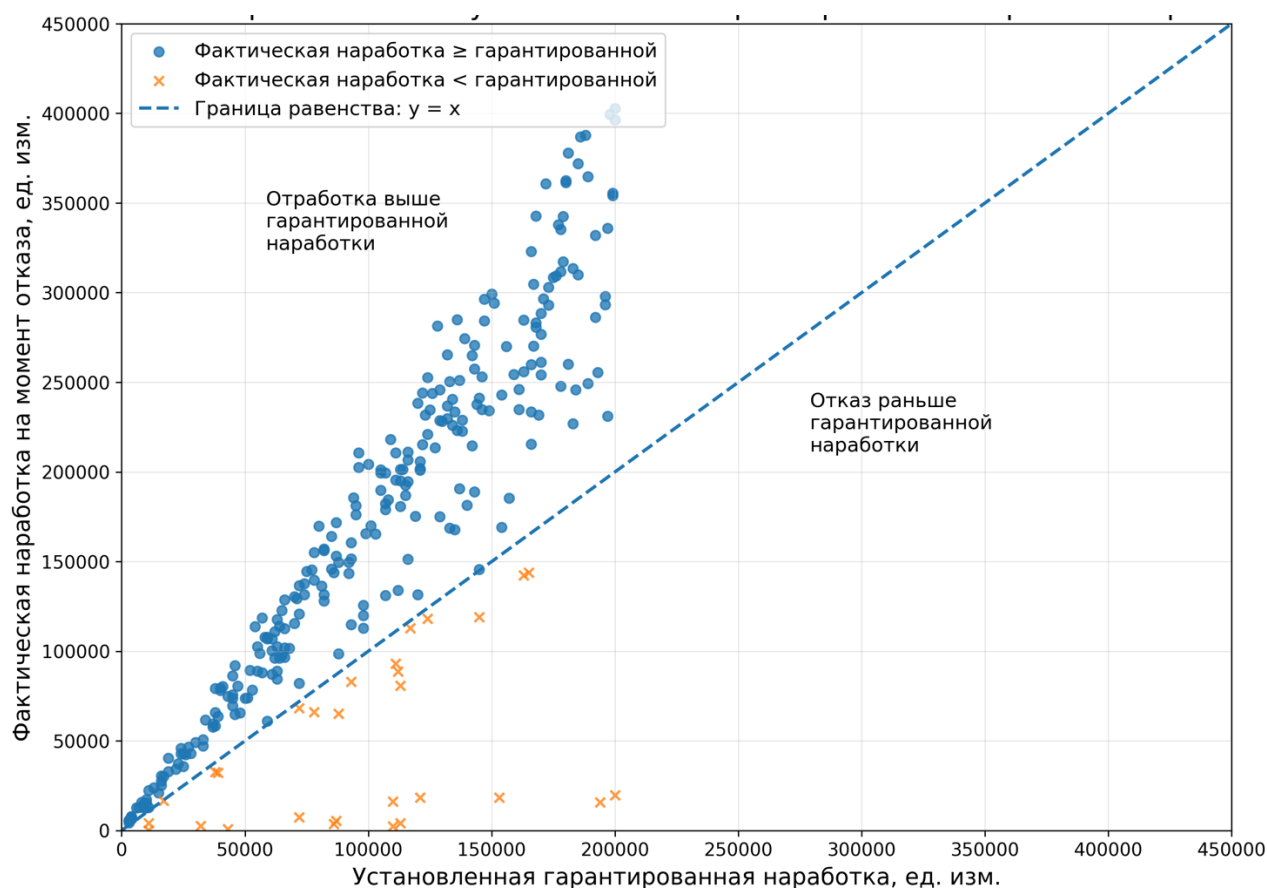
стабильную работу изделия до этого значения наработки. Дальнейшая эксплуатация изделия возможна при уверенности в стабильности работы инженером предприятия и не гарантируется изготовителем.

Зачастую работа изделий после назначенного ресурса характеризуется значительным повышением потока отказов и резким приближением изделия к критическому состоянию. Смысл назначения ресурса лежит в предоставлении гарантии потребителю на работоспособность изделия на минимальное указанное количество работы. Для дорогостоящих агрегатов, однако, эксплуатация до назначенного ресурса зачастую неэффективна ввиду низких значений ресурса и высоких затрат на замену. Техническое обслуживание отдельных элементов таких систем повышает срок эксплуатации и требует намного меньших вложений.

Предупреждение отказов в таких системах способствует снижению вероятности дополнительных зависимых отказов других элементов системы и жизнеспособности всего агрегата в целом. Для такого прогнозирования необходима оценка зависимости вероятности отказа от текущей наработки.

С целью выявления возможной зависимости было проанализировано 293 агрегата на силовых и транспортных средствах автопарка специальной автомобильной техники МАУ, отражённых в отчётах технической службы в ходе эксплуатации и работы предприятия. Для выборки были отобраны элементы с известным значением назначенного ресурса и наработки на момент отказа. Все элементы имеют собственные единицы измерения, описанные ранее, что не сказывается на относительном значении наработки ресурса.

Результаты представлены на рисунке 3.3



по X – установленная гарантированная наработка, по Y – фактическая наработка на момент отказа, по XY – диагональ, демонстрирующая отказ до/после гарантированного срока.

Рисунок 3.3 – График зависимости количества отказов от отношения текущей наработки к назначенному ресурсу изделия

Среднее значение отношения наработки на момент отказа к назначенному ресурсу оказалось равным 1,5792, что означает, что в среднем отобранные элементы отработали на 57,92% больше своего назначенного ресурса. На диаграмме превышение значения наработки означает использование детали больше назначенного ресурса, а при большем значении назначенного ресурса отказ произошёл до достижения установленного значения ресурса. Оказалось, что из 293 узлов лишь 29 не достигли своего назначенного срока службы, что равняется 10% от выборки. Причём из них 9 отказали при наработке менее 10%, 7 изделий отказали при значении отношения до 75% и 13 при значениях, близких к 100%, то

есть на границе назначенного ресурса. Данное отношение приведено на рисунке 3.4.

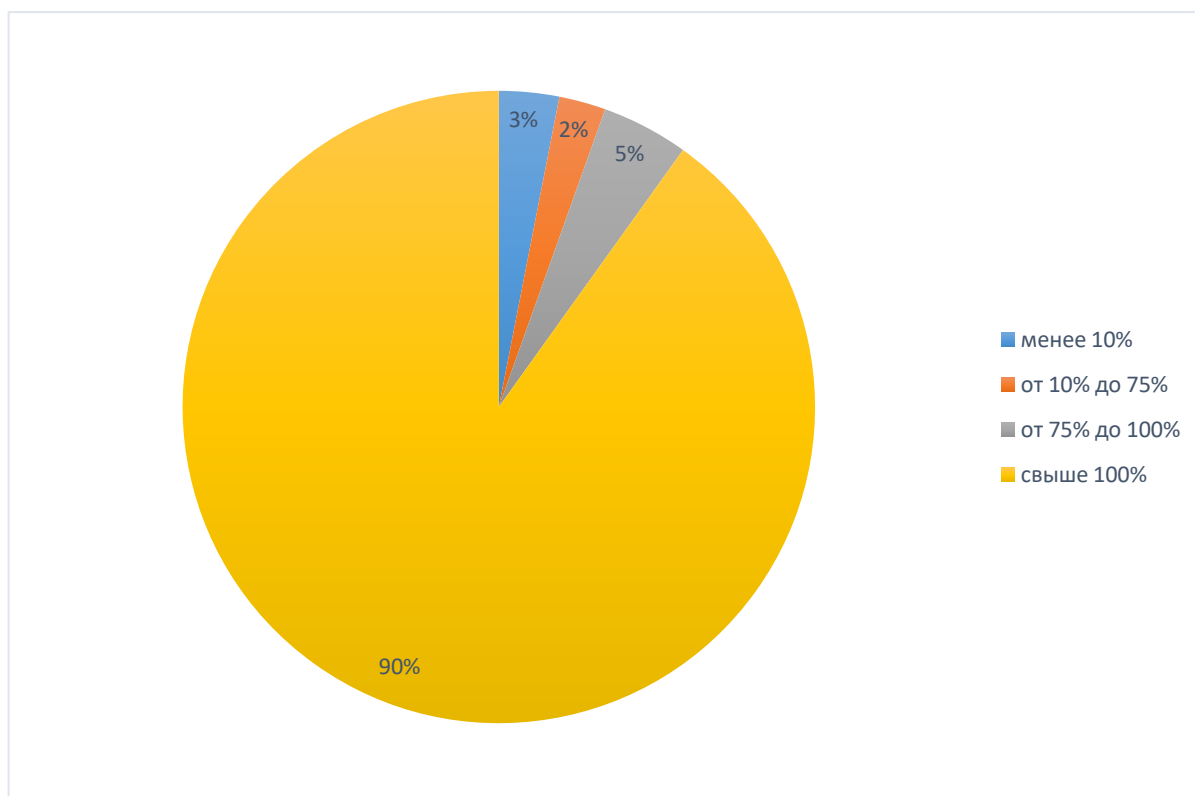


Рисунок 3.4 – Распределение отказавших узлов от соотношения фактической наработки на отказ

Для оценки значения вероятности отказов построим график зависимости количества отказов от отношения текущей наработки к назначенному ресурсу изделия. Такое распределение приведено на рисунке 3.5.

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 характеризуется их качеством, условиями эксплуатации и внешними факторами.

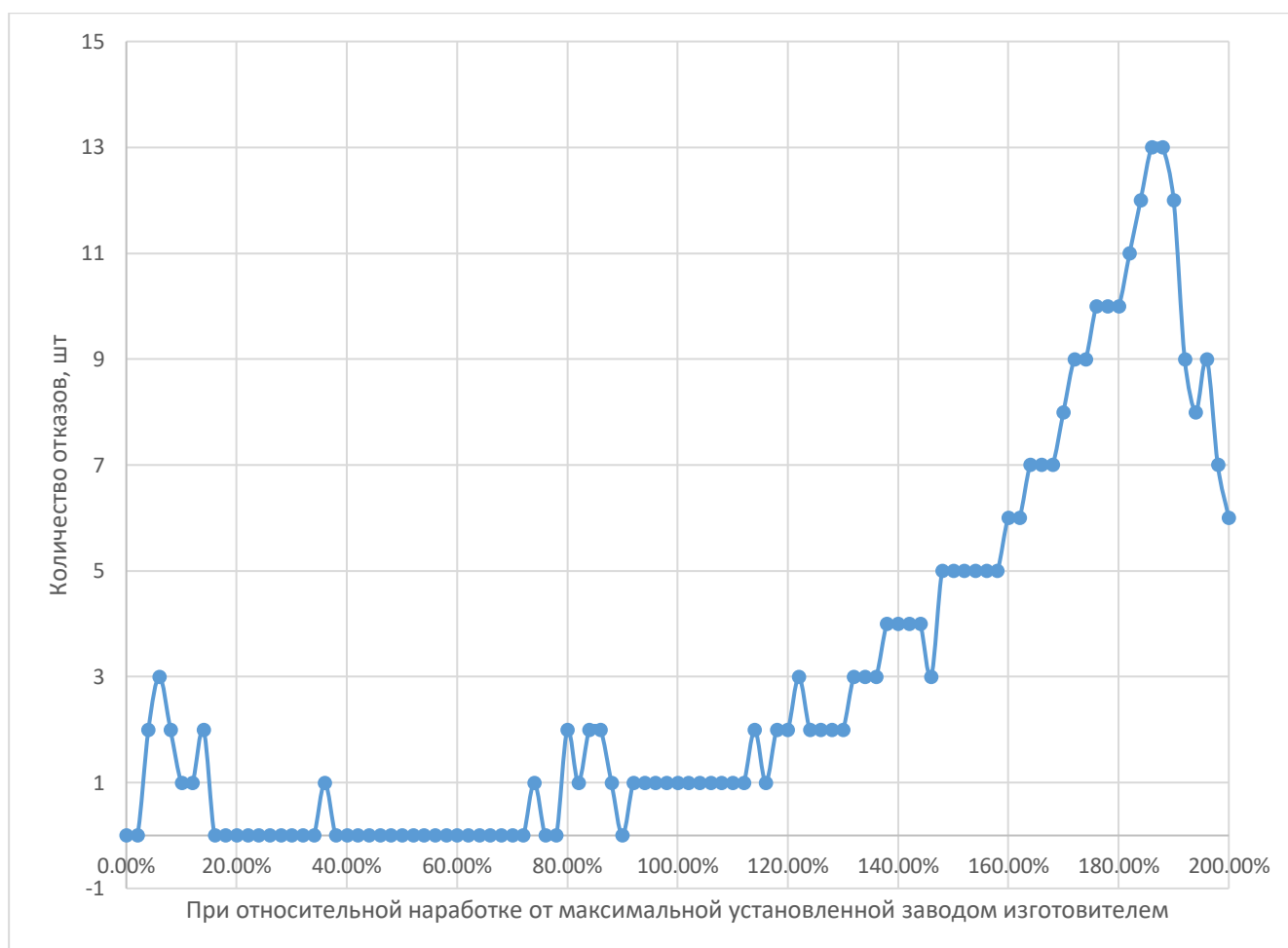


Рисунок 3.5 – График зависимости количества отказов от отношения текущей наработки к назначенному ресурсу изделия

Некоторые отказы в зоне от 20% до 80% скорее всего вызваны условиями эксплуатации агрегатов специальной автомобильной техники или зависимыми 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. Связано это для большинства деталей с приближением к назначенному ресурсу и напрямую зависит от него.

После работы сверх назначенного ресурса наблюдается значительное увеличение частоты отказов, плавно вырастающее вплоть до 180%. Очевидно влияние переработки агрегата и приближение к лимитам ресурса. После 180%

наблюдается снижение количества отказов, связанное с уменьшением общего количества деталей, доработавших до таких значений относительной наработки.

При искусственном укрупнении и сглаживании кривой выборки наблюдается зависимость, похожая на показательную функцию отношения наработки к назначенному ресурсу. Искусственно укрупнённый график этой зависимости приведён на рисунке 3.6.

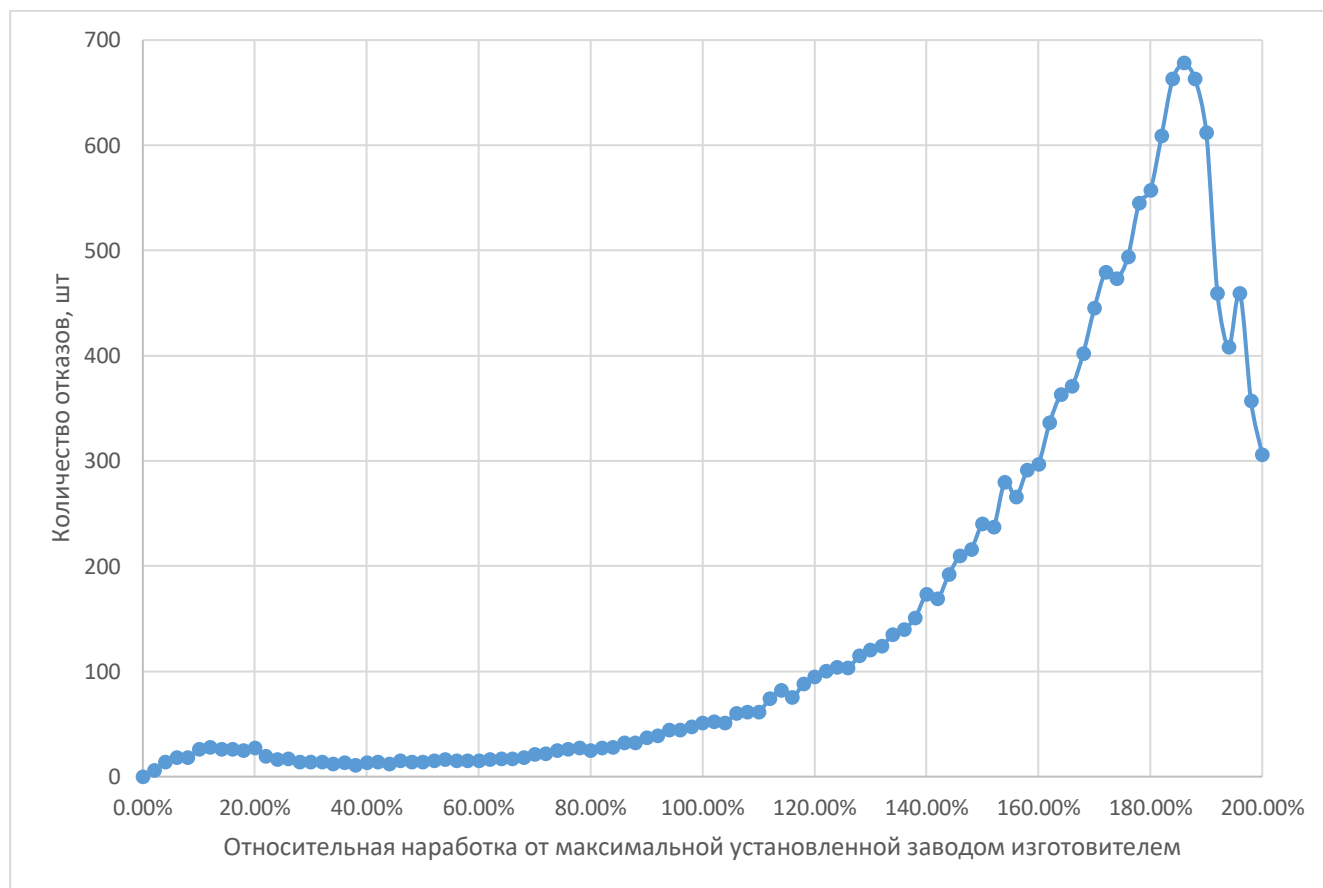


Рисунок 3.6 – Сглаженный график зависимости количества отказов агрегатов техники от отношения текущей наработки к назначенному ресурсу изделия

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 к 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 преобразование привести к вероятности отказа путём математических преобразований получаем уравнение:

$$p_{\text{отк}} = \frac{\left((E_{\text{наз}})^{\frac{1}{E_{\text{max}}}} \right)^E}{E_{\text{наз}}} = \frac{E_{\text{max}} \sqrt[E]{E_{\text{наз}}}}{E_{\text{наз}}} \quad (3.2)$$

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.

Кривая графика данной функции приведена на рисунке 3.7.

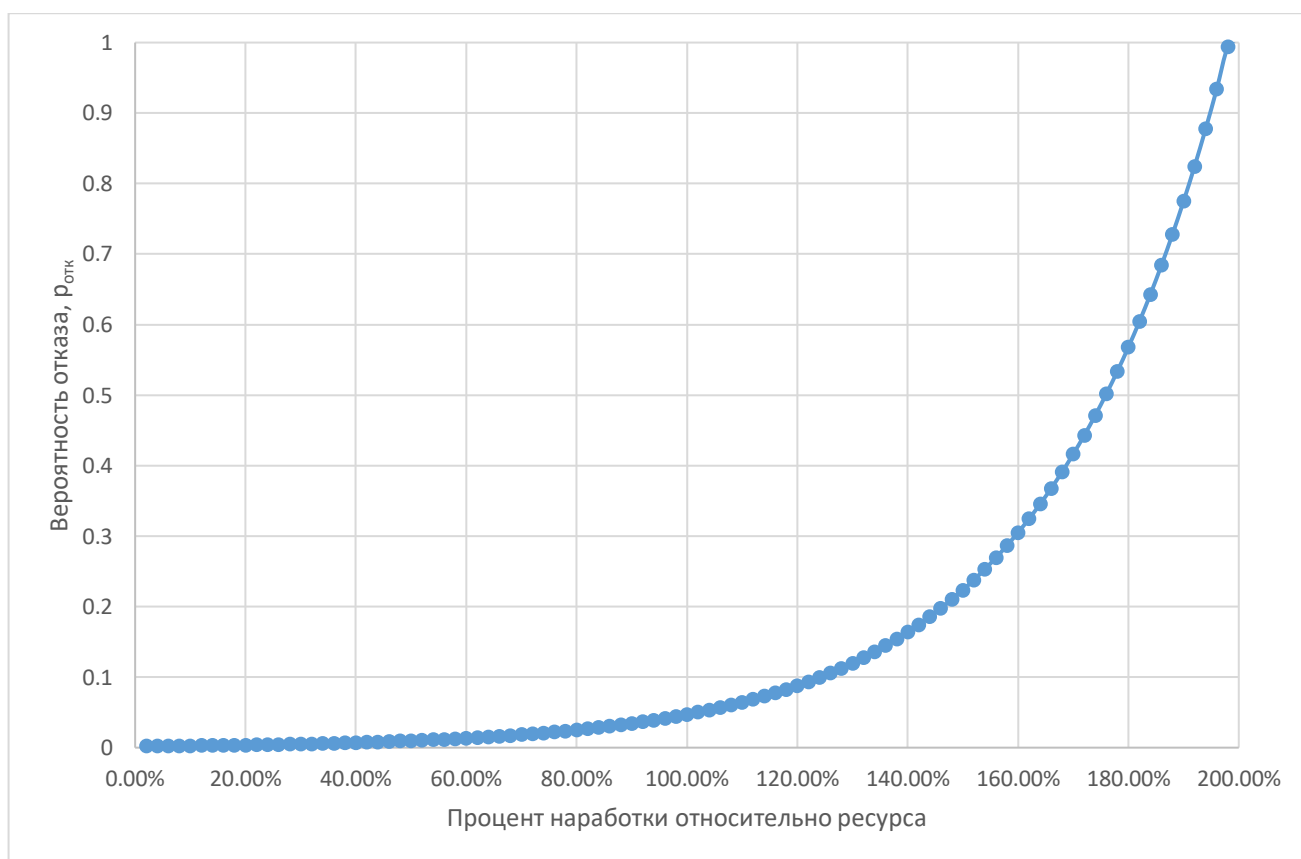


Рисунок 3.7 – График функции вероятности отказа

Данная кривая является одной проекцией при определённом значении назначенного ресурса, для выражения всех возможных значений пусть:

$$K = \frac{E}{E_{\text{наз}}} \quad (3.3)$$

Тогда:

$$p_{\text{отк}} = \frac{\left((E_{\text{наз}})^{\frac{1}{2 \cdot E_{\text{наз}}}} \right)^{K \cdot E_{\text{наз}}}}{E_{\text{наз}}} = \frac{2 \cdot E_{\text{наз}} \sqrt{E_{\text{наз}}^{K \cdot E_{\text{наз}}}}}{E_{\text{наз}}}, 0 \leq K \leq 2, E_{\text{наз}} > 0. \quad (3.4)$$

А общий вид поверхности изображён на рис. 3.8.

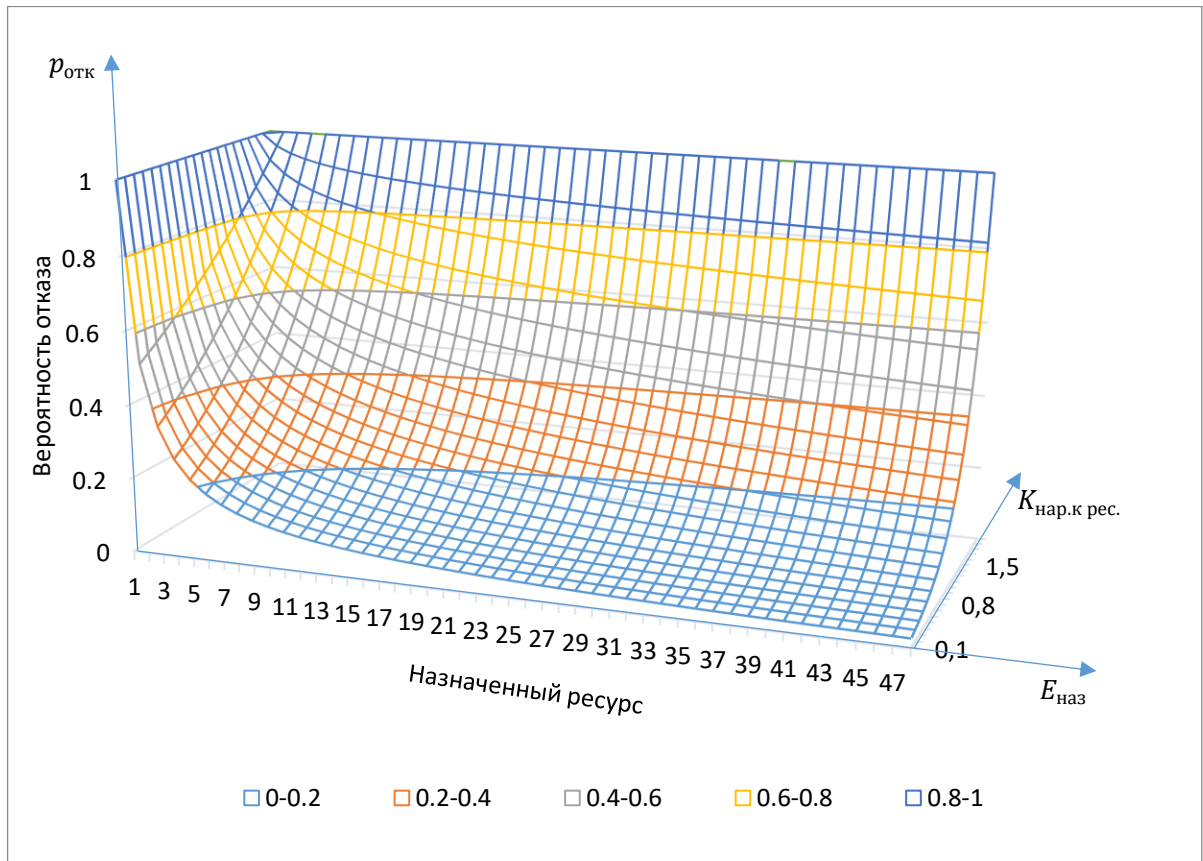


Рисунок 3.8 – График зависимости вероятности отказа агрегатов техники к назначенному ресурсу (при $1 \leq E_{\text{наз}} \leq 48$)

Заметно, что при малоразмерном значении ресурса результаты уравнения сильно отличаются, однако при порядковом превосходстве значения назначенного ресурса плоскость уравнивается и переходы становятся более плавным. На практике значения изделий, работа которых измеряется в показателях менее 1000, например штучных замерах, малоэффективны и отслеживание технического состояние 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 3.9.

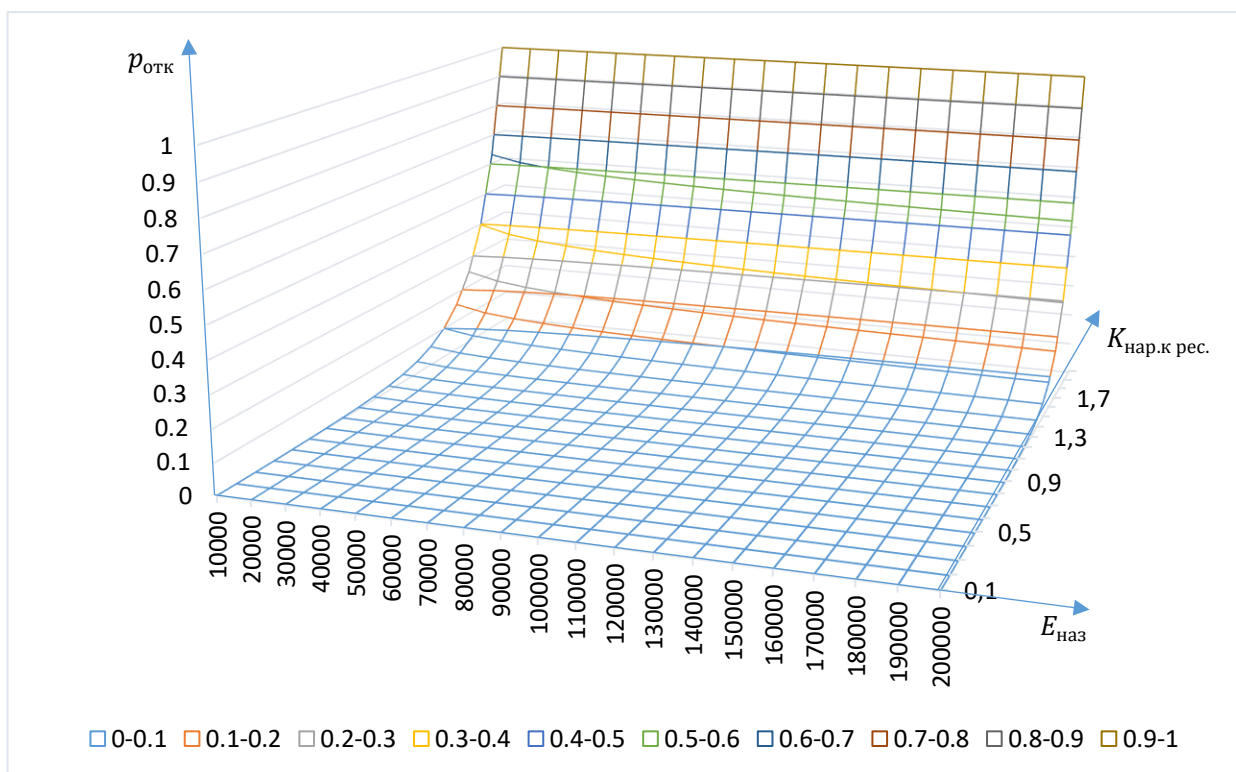


Рисунок 3.9 – График зависимости вероятности отказа агрегатов техники к назначенному ресурсу (при $10000 \leq E_{\text{наз}} \leq 200000$)

Такие рамки ресурса характерны для автотранспортной отрасли, например, замера километража и пробега. Очевидно, что при увеличении размерности единиц измерения полезной работы агрегатов увеличивает 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 x :

$$p'_{\text{отк}} = \left(\frac{\left(E_{\text{наз}}^{\frac{1}{2 \cdot E_{\text{наз}}}} \right)^x}{E_{\text{наз}}} \right)' \quad (3.5)$$

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

$$p'_{отк} = \frac{1}{E_{наз}} \left(\left(E_{наз}^{\frac{1}{2 \cdot E_{наз}}} \right)^x \right)' \quad (3.6)$$

2) $\left(E_{наз}^{\frac{1}{2 \cdot E_{наз}}} \right)^x$ - степенная функция, производная $\left(E_{наз}^{\frac{1}{2 \cdot E_{наз}}} \right)^x \cdot \ln \left(E_{наз}^{\frac{1}{2 \cdot E_{наз}}} \right)$

Упростим правую часть:

$$\ln \left(E_{наз}^{\frac{1}{2 \cdot E_{наз}}} \right) = \frac{1}{2 \cdot E_{наз}} \cdot \ln(E_{наз}) = \frac{\ln(E_{наз})}{2 \cdot E_{наз}} \quad (3.7)$$

Итоговая производная:

$$p'_x = \frac{1}{E_{наз}} \cdot \left(E_{наз}^{\frac{1}{2 \cdot E_{наз}}} \right)^x \cdot \frac{\ln(E_{наз})}{2 \cdot E_{наз}} = \frac{\left(E_{наз}^{\frac{1}{2 \cdot E_{наз}}} \right)^x \cdot \ln(E_{наз})}{2 \cdot E_{наз}^2} \quad (3.8)$$

$$v_{р_{отк}} = \frac{2 \cdot E_{наз} \sqrt{E_{наз}} \cdot K \cdot E_{наз} \cdot \ln E_{наз}}{2 \cdot E_{наз}} = p_{отк} \frac{\ln E_{наз}}{2 E_{наз}} \quad (3.9)$$

где, $v_{р_{отк}}$ – скорость изменения вероятности отказа в зависимость от текущей наработки

График такой функции приведён на рисунке 3.10 при $E_{наз} = 500$.

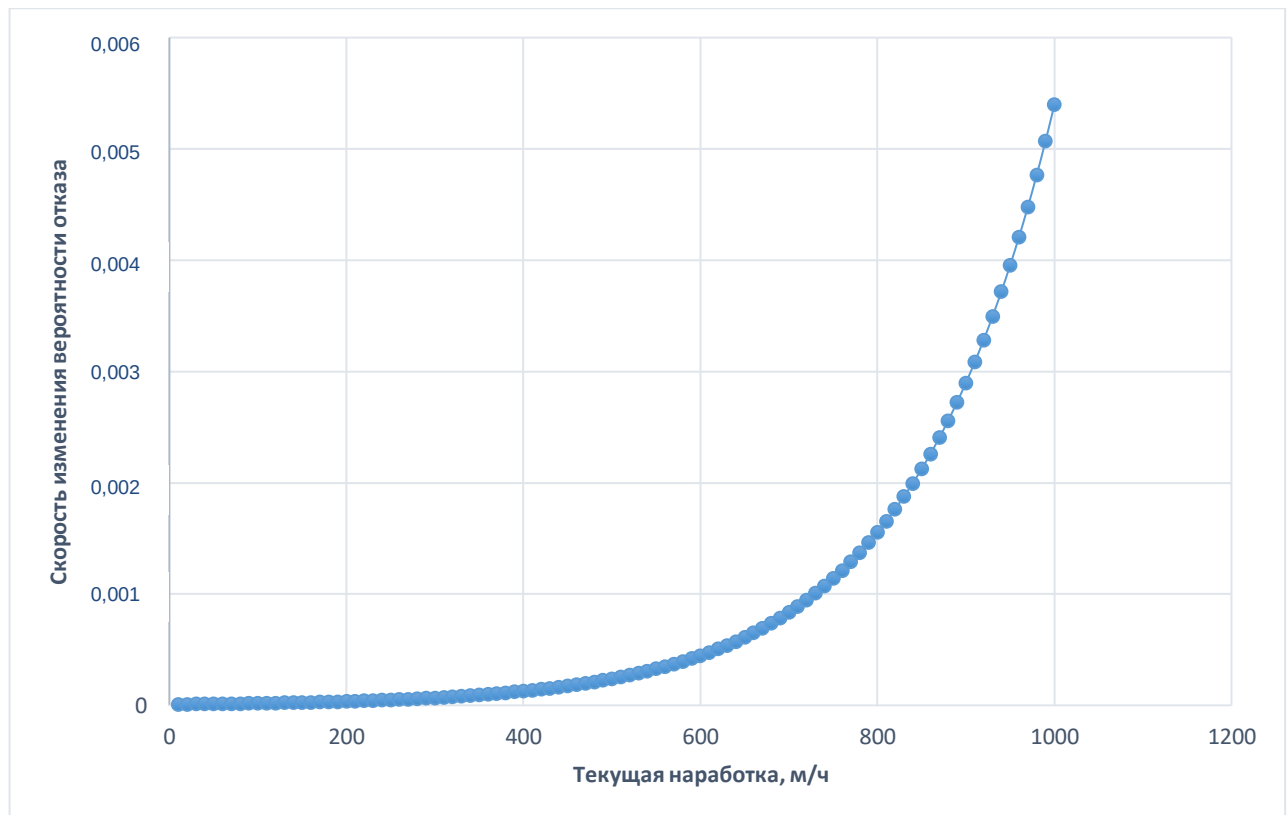


Рисунок 3.10 – График функции скорости изменения значения вероятности отказа агрегатов техники

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 плоскости в общем виде приведён на рисунке 3.11.

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.

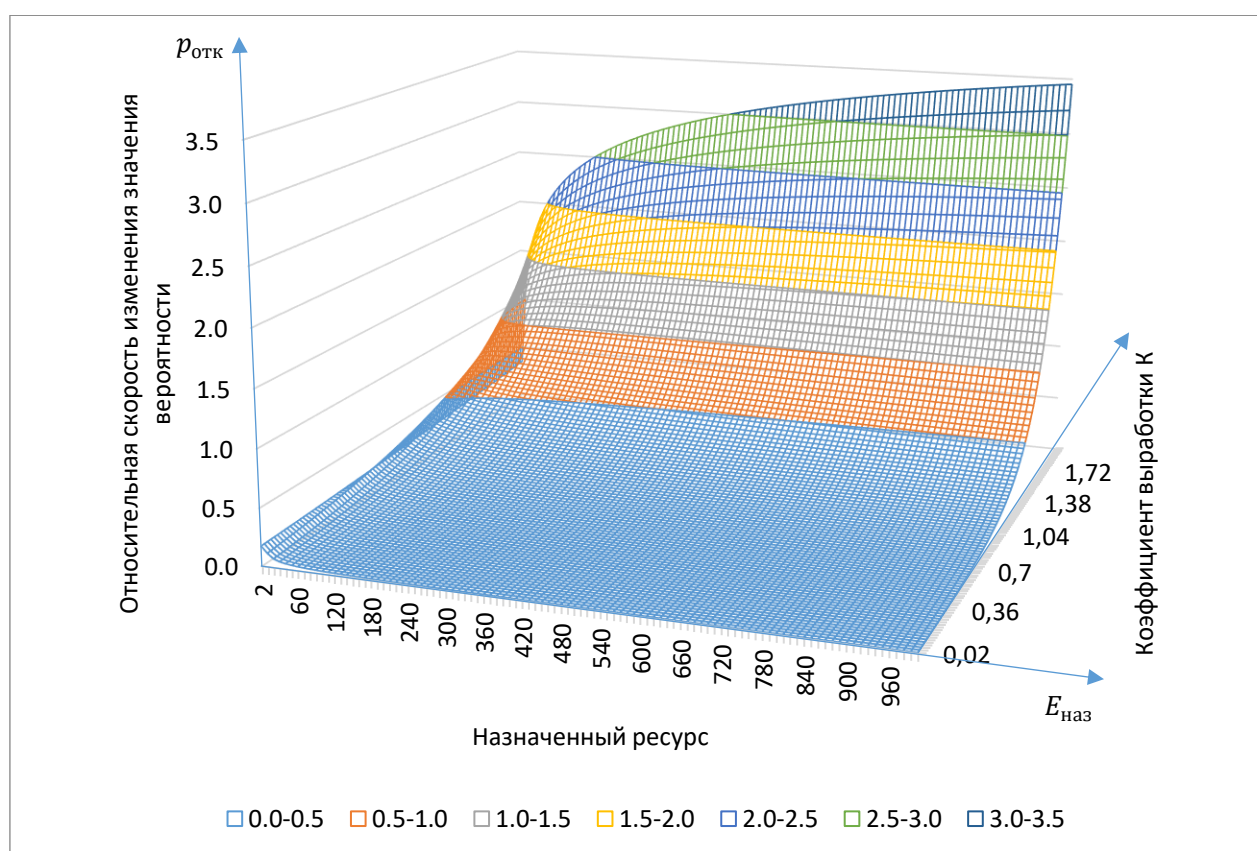


Рисунок 3.11 – График скорости нарастания вероятности отказа агрегатов техники

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 [172-174].

Возьмем интеграл от $p'_{\text{отк}}$ по x :

$$\int_0^{2E_{\text{наз}}} \frac{\left(E_{\text{наз}}^{\frac{1}{2 \cdot E_{\text{наз}}}}\right)^x \cdot \ln(E_{\text{наз}})}{2 \cdot E_{\text{наз}}^2} dx = \frac{\ln(E_{\text{наз}})}{2 \cdot E_{\text{наз}}^2} \int_0^{2E_{\text{наз}}} \left(E_{\text{наз}}^{\frac{1}{2 \cdot E_{\text{наз}}}}\right)^x dx$$

После очевидных преобразований получим;

$$\frac{\ln(E_{\text{наз}})}{2 \cdot E_{\text{наз}}^2} \int_0^{2E_{\text{наз}}} e^{\frac{\ln(E_{\text{наз}})x}{2 \cdot E_{\text{наз}}}} = \frac{\left(E_{\text{наз}}^{\frac{1}{2 \cdot E_{\text{наз}}}}\right)^{2E_{\text{наз}}}}{E_{\text{наз}}} - \frac{\left(E_{\text{наз}}^{\frac{1}{2 \cdot E_{\text{наз}}}}\right)^0}{E_{\text{наз}}} = 1 - \frac{1}{E_{\text{наз}}}$$

Видим, что величина определенного интеграла меньше на величину $-\frac{1}{E_{\text{наз}}}$. Это происходит потому, что функция вероятности начинает расти не с нуля, а именно с величины $-\frac{1}{E_{\text{наз}}}$. Эту величину можно трактовать как вероятность отказа на нулевом пробеге.

3.3 Алгоритм имитационного моделирования наработки узлов агрегатов специальной автомобильной техники аэропортов

Как было показано ранее модель использует относительные значения наработки к ресурсу изделия, что обеспечивает вариативность в выборе единиц её измерения. Нарботка может быть, как непрерывной величиной (продолжительность работы двигателя в мото-часах, пробег автомобиля в км), так и целочисленной величиной (число рабочих циклов, запусков и т.п.). Текущая наработка машины является функцией времени, нарастающей со скоростью, определяемой совершённой полезной работой изделием в установленный промежуток времени

$$E = e \cdot t \quad (3.11)$$

где, e – работа за единицу времени.

С такой точкой зрения работу за единицу времени можно считать производительностью машины и считать равной.

$$e = \frac{dE}{dt} \quad (3.12)$$

Среднюю производительность машины определяют отношением её общей выработки к всему времени полезной работы машины:

$$\bar{e} = \frac{\Sigma E}{t} \quad (3.13)$$

Для машин, проходящих техническое обслуживание и диагностику такое значение возможно определить на момент их прохождения и сравнивать со значениями за прошедший период так же, как и оценивать среднюю скользящую производительность по ходу эксплуатации изделия.

Другим методом определения производительность машины может служить статистическое отслеживание выполняемой ей работы, как например оценка графика работ для выявления полезной работы каждый день. Очевидно, что в течении длительного времени пребывания АТС в автопарке каждодневная работа будет разной. Средние значения полезны при общей оценки эффективности эксплуатации парка АТС, однако ошибочны в задачах моделирования. Использование детерминированного показателя производительности приводит к одинаковым результатам работы алгоритмов имитационного моделирования при проведении множества циклов симуляции [175].

Считается, что наработка подчинена нормальному распределению (нормально распределена), если плотность распределения отказов (ПРО) описывается выражением:

$$f(t) = \frac{1}{S \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp - \frac{(t-a)^2}{2 \cdot S^2} \quad (3.14)$$

где, a и S – параметры распределения, соответственно, математического ожидания и среднего квадратичного отклонения, которые по результатам испытаний принимаются:

$$a \approx \dot{T}_0, S^2 = \dot{D} \quad (3.15)$$

где, $\dot{T}_0$, $\dot{D}$ – оценки средней наработки и дисперсии.

Это означает, что производительность агрегатов и узлов специальной автомобильной техники может быть описана распределением Гаусса:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2} \quad (3.16)$$

где, μ – математическое ожидание (среднее значение), медиана и мода распределения,

σ – среднеквадратическое отклонение,

Для подтверждения соответствия распределения производительности специальной автомобильной техники в аэропортах МАУ была проведена выборка значений полезной работы одного перронного автобуса Neoplan P84 N9122L аэропорта Домодедово в 2023 году (рис. 3.12).

Neoplan Airliner, Neoplan Flughafenbus — перронный автобус немецкого производства, серийно производится в Штутгарте с 1977 года. Эти автобусы отличаются огромной шириной 2,7 или 3,2 метра и повышенной вместимостью за счет уменьшения до минимума сидячих мест.

Автобусы низкопольные, что позволяет перевозить в них крупногабаритные колесные клади. Имеет изогнутое вперед лобовое стекло, стеклоочистители расположены друг над другом. На крыше установлена мигалка, которая включается при полной загрузке автобуса. Автобус двухосный, однако под боковой «юбкой» автобуса колес почти не видно, а двери расположены лишь в средней части автобуса (иногда одни из них сзади с правой стороны). Также автобус имеет огромное заднее стекло; благодаря этим приметам автобус сильно напоминает вагон метро. Характеристики автобуса приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Технические характеристики Neoplan P84 N9122L

Модель	Neoplan Airliner N 9122 L
Габаритные размеры, длина / ширина / высота	14720/3170/3000
Колёсная база, мм	8210
Клиренс, мм	120

Общая пассажировместимость, чел	136
Двигатель, название	MAN D0836 LOH
Система контроля за выбросами, тип	Евро-3
Мощность, кВт / л.с.	162/220
Максимальная скорость, км / ч	125



Рисунок 3.12 – Neoplan P84 N9122L Apron № 105163

В современных крупных аэропортах перронные автобусы часто используются для перевозки пассажиров между аэровокзалом и небольшими воздушными судами, вмещающими обычно не более 100 пассажиров. Также они применяются для высадки и посадки пассажиров при внеплановых или задержавшихся рейсах, когда использование телескопических трапов нецелесообразно.

Конкретное количество рейсов и, соответственно, производительность одной единицы, обслуживаемых перронными автобусами в аэропортах, может зависеть от множества факторов, включая расписание рейсов, погодные условия и технические возможности аэропорта.

Исследование наработки и производительности перронного автобуса проводилось ежедневным учётом изменения приборного пробега специальной автомобильной техники. Результаты мониторинга приведены на рисунке 3.13.

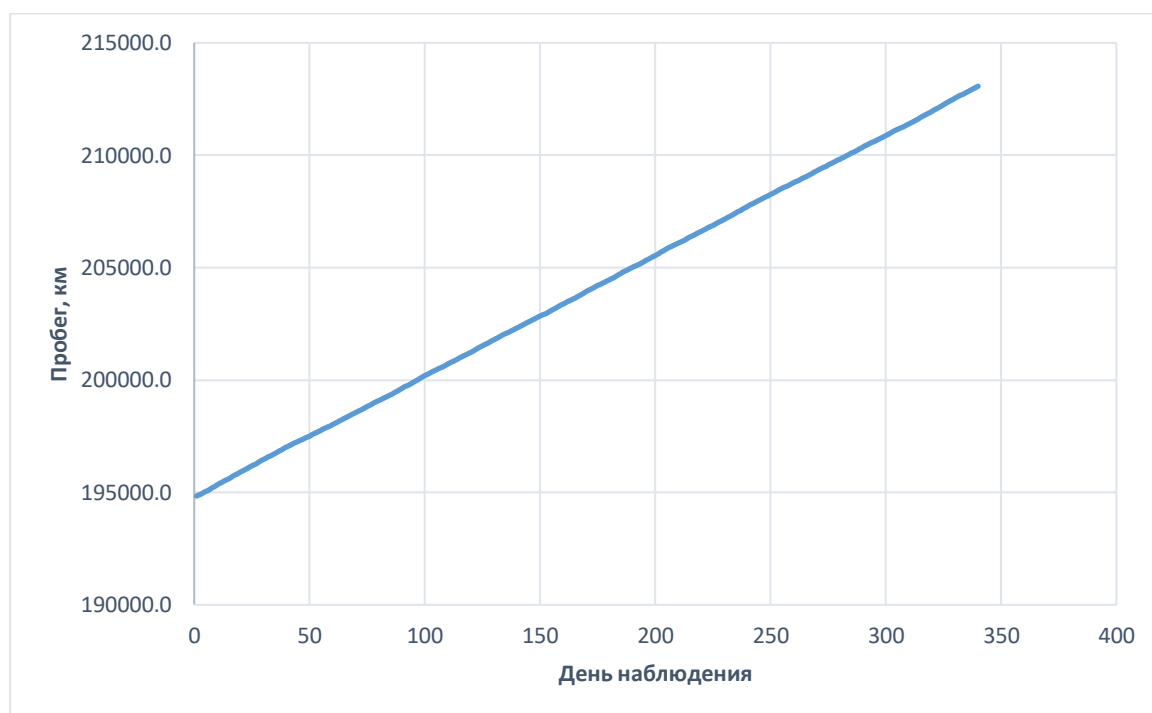


Рисунок 3.13 – Приборный пробег Neoplan P84 N9122L

Из выборки исключаются дни простоя АТС в ремонте, резерве и непроизводительные дни. Имея данные о показателях общей наработки машины, определим дневную производительность перронного автобуса. Результаты приведены на рисунке 3.14.

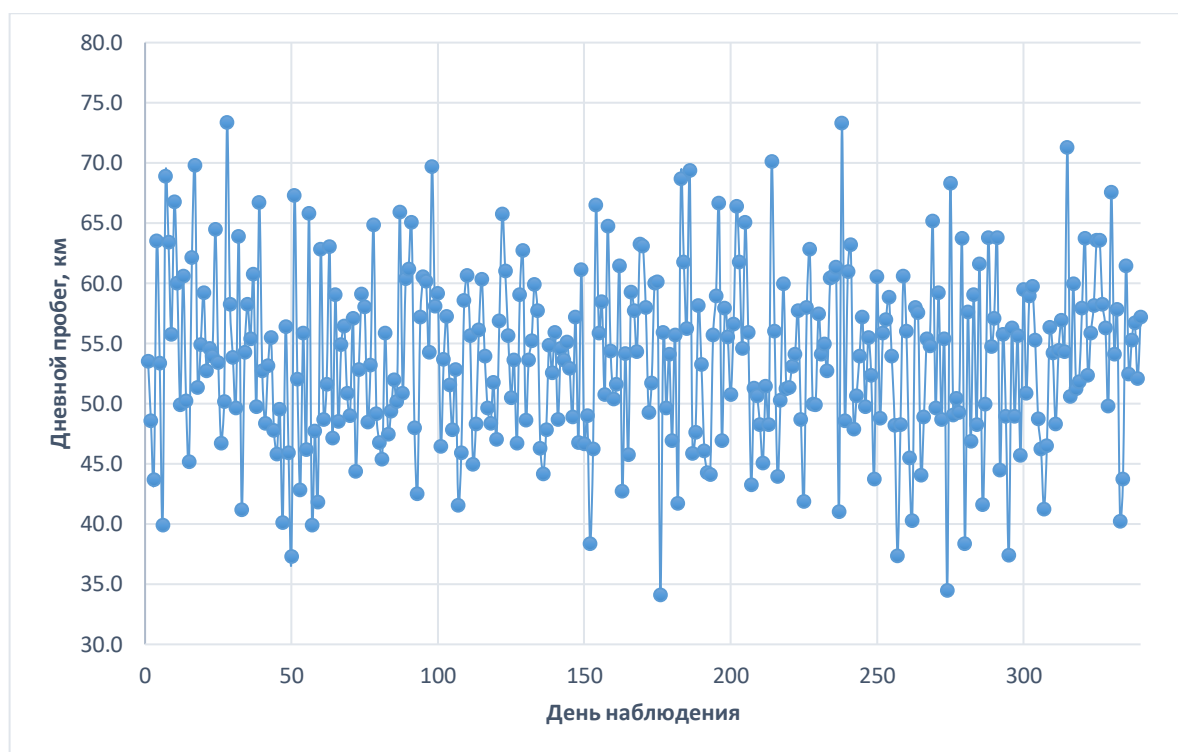


Рисунок 3.14 – Дневная производительность Neoplan P84 N9122L

Наблюдается разница в производительности в 39,3 км. Такая разница возможна обусловлена особыми условиями эксплуатации в чрезмерно нагруженные и наоборот непроизводительные дни. Максимальная дневная производительность оказалась равной 73,4 км, что при средней длине маршрута от выхода на посадку до самолёта равной 1,4 км означает участие в 50 рейсах за день. Минимальная наработка равна 34,1 км, что более чем в два раза меньше максимальной и равняется участию в 20 рейсах.

Не стоит исключать ошибки в вычислениях, так как экстремальные значения производительности могли быть получены ввиду удвоения результатов снятия приборных показателей, искусственному изменению приборного пробега при прохождении технического обслуживания и другие внешние факторы.

При построении гистограммы частот наблюдаем картину на рисунке 3.15. Графически распределение похоже на нормальное. Подтвердим гипотезу критерием согласия методом Пирсона.

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i} \quad (3.17)$$

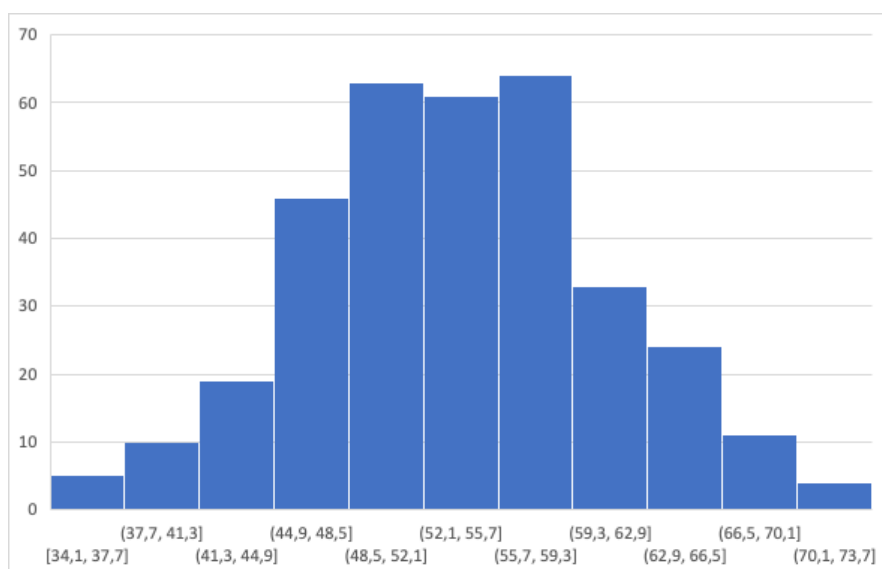


Рисунок 3.15 – Диаграмма частот проявления значений производительности

Разделим выборку на 11 интервалов, определим медианы рядов и частоты попадающих в них значений. Результаты приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты эмпирических измерений

Номер интервала	Границы интервала		Медиана	Частоты	Средняя сумма
i	x_i	x_{i+1}	x_i^C	n_i	$x_i^C \cdot n_i$
1	34,1	37,7	35,9	5	179,5
2	37,7	41,3	39,5	10	395
3	41,3	44,9	43,1	19	818,9
4	44,9	48,5	46,7	46	2148,2
5	48,5	52,1	50,3	63	3168,9
6	52,1	55,7	53,9	61	3287,9
7	55,7	59,3	57,5	64	3680
8	59,3	62,9	61,1	33	2016,3
9	62,9	66,5	64,7	24	1552,8
10	66,5	70,1	68,3	11	751,3
11	70,1	73,7	71,9	4	287,6
					$\sum_i x_i^C \cdot n_i = 18286,4$

Тогда выборочная средняя равна:

$$\bar{x}_B = \frac{\sum_i x_i^c \cdot n_i}{n} = 53,783 \quad (3.18)$$

Дисперсия:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{n} = 52,312 \quad (3.19)$$

И среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{n}} = 7,232 \quad (3.20)$$

Для вычисления теоретических частот n_i' сначала нужно от величины X перейти к нормированной случайной величине Z и найти границы интервалов (z_i, z_{i+1}), соответствующих интервалам (x_i, x_{i+1}). Результаты вычисления приведены в таблице 3.3.

$$Z = \frac{X - \bar{x}_B}{\sigma} \quad (3.21)$$

Таблица 3.3 – Вычисление границ интервалов нормированной случайной величины.

Номер интервала	x_i – $\bar{x}_B$	$x_{i+1} - \bar{x}_B$	Границы интервала	
			z_i	z_{i+1}
1	$-\infty$	-16,1	$-\infty$	-2,224
2	- 16,1	-12,5	-2,224	-1,726
3	- 12,5	-8,9	-1,726	-1,228
4	-8,9	-5,3	-1,228	-0,731
5	-5,3	-1,7	-0,731	-0,233
6	-1,7	1,9	-0,233	0,265
7	1,9	5,5	0,265	0,763
8	5,5	9,1	0,763	1,260
9	9,1	12,7	1,260	1,758
10	12,7	16,3	1,758	2,256
11	16,3	$+\infty$	2,256	$+\infty$

Затем нужно вычислить теоретические вероятности p_i попадания величины X в интервалы (x_i, x_{i+1}) . Воспользуемся функцией Лапласа для вычисления теоретических вероятностей.

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (3.22)$$

Теоретические вероятности определяются по формуле:

$$p_i = \Phi(z_{i+1}) - \Phi(z_i) \quad (3.23)$$

А теоретические частоты:

$$n'_i = n \cdot p_i \quad (3.24)$$

Расчёт теоретических частот приведён в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты расчёта теоретических частот нормального распределения

Номер интервала	$\Phi(z_i)$	$\Phi(z_{i+1})$	p_i	n'_i
1	-0,500	-0,487	0,013	4,449
2	-0,487	-0,458	0,029	9,891
3	-0,458	-0,390	0,068	22,951
4	-0,390	-0,267	0,123	41,773
5	-0,267	-0,092	0,175	59,646
6	-0,092	0,104	0,197	66,814
7	0,104	0,277	0,173	58,717
8	0,277	0,396	0,119	40,482
9	0,396	0,461	0,064	21,895
10	0,461	0,488	0,027	9,289
11	0,488	0,500	0,012	4,093

Для расчёта коэффициента Пирсона найдём отклонения эмпирических частот от теоретических. Их сумма и будет равняться коэффициенту хи-квадрат. Результаты расчётов приведены в таблице 3.5.

Число групп выборки $s = 11$, число степеней свободы $k = s - 3 = 8$, по таблице критических точек распределения при уровне значимости 0,50 находим значение $X_{кр}^2 = 7,344$.

Так как $X_n^2 < X_{кр}^2$ то нет оснований отвергнуть гипотезу о нормальности распределения генеральной совокупности. Различие наблюдаемых и

теоретических частот является незначимым. Это различие вызвано случайностью при составлении выборки и не противоречит утверждению, что распределение генеральной совокупности является нормальным.

Таблица 3.5 – Результаты расчёта коэффициента Пирсона

Номер интервала	Эмпирические частоты	Теоретические частоты	Отклонения
i	n_i	n'_i	$\frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}$
1	5	4,449	0,068
2	10	9,891	0,001
3	19	22,951	0,680
4	46	41,773	0,428
5	63	59,646	0,189
6	61	66,814	0,506
7	64	58,717	0,475
8	33	40,482	1,383
9	24	21,895	0,202
10	11	9,289	0,315
11	4	4,093	0,002

Итоговое значение коэффициента Пирсона:

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i} = 4,249$$

Таким образом можно утверждать, что дневная производительность специальной автомобильной техники автопарка МАУ подвергается нормальному закону распределения в зависимости от дня наблюдения. Неопределённости в вычисления вносят переменные условий эксплуатации, изменения пассажиропотоков по дням недели, месяцам, погодным условиям и т.п.

Для имитации каждодневной работы узлов и агрегатов специальной автомобильной техники в модели будет использовано нормальное распределение вероятности определённого значения наработки в зависимости от интервала

значений между статистической максимальной и минимальной наработкой отдельных узлов за предшествующее время работы до моделирования.

Текущая наработка изделия в момент времени t определяется по формуле:

$$E_t = E_{t-1} + e(k(p)) \quad (3.25)$$

где, E_{t-1} – наработка на окончание предыдущего дня

$e(k(p))$ – значение дневной наработки от коэффициента значения интервала.

$(k(p))$ – коэффициент значения интервала $k \in (-1, 1)$ показывает положение имитируемой наработки в интервале статистических данных наработки отклонения вероятности, где ноль соответствует середине интервала, -1 минимальному значению дневной наработки, а 1 максимальному.

$$k = \pm p \quad (3.26)$$

Значение вероятности будет генерироваться случайным образом согласно нормальному распределению. Знак перед вероятностью так же генерируется случайным образом.

$$p \in (0, 1) \quad (3.27)$$

Таким образом для имитации 50 дней работы изделия достаточно информации о состоянии на нулевой день E_0 и интервала распределения значений дневной производительности $e(k) \in (e_{\min}, e_{\max})$. Постепенно модель имитирует работу изделия каждый из 50 дней, вычисляя E_t в зависимости от результатов прошлого цикла.

Для примера приведём имитацию 10 дней работы нового изделия, экстремальные значения производительности для которого известны. Исходные данные: $E_0 = 0$ км, $e_{\min} = 40$ км, $e_{\max} = 60$ км. Результаты моделирование приведены в таблице 3.6.

Значения имитированной производительности находятся в рамках установленной минимальной и максимальной производительности. Значение наработки увеличивается на значение имитированной производительности. Значение на 10-ый день имитации получено после вычисления всех предыдущих дней. При использовании среднего значения на тот же момент времени наработка

равнялась бы 500 км, что отличается на 5,403 км, однако низкое отклонение характеризуется небольшим размером интервала производительности и продолжительностью имитации.

Таблица 3.6 – Результаты моделирования

День	Наработка, км	Имитированная производительность, км/день
0	0	-
1	46,557	46,557
2	94,981	48,423
3	143,270	48,289
4	184,725	41,456
5	234,107	49,382
6	293,989	59,882
7	346,761	52,772
8	393,602	46,842
9	438,046	44,443
10	494,597	56,551

Проведём аналогичное исследование для более экстремальных значений исходных данных: $E_0 = 0$ км, $e_{\min} = 20$ км, $e_{\max} = 80$ км, $t = 50$ сут. Дополнительно проведём ещё один цикл имитации для определения воздействия неопределённости. Результаты моделирования представлены в таблицах 3.7 и 3.8.

Таблица 3.7 – Результаты моделирования (1-ый цикл)

t, сут	E, км	e, км/сут	t, сут	E, км	e, км/сут	t, сут	E, км	e, км/сут	t, сут	E, км	e, км/сут	t, сут	E, км	e, км/сут
1	48	48	11	545	79	21	1022	44	31	1624	54	41	2217	78
2	70	22	12	579	35	22	1066	44	32	1664	40	42	2290	73
3	114	44	13	620	40	23	1110	44	33	1713	48	43	2368	78
4	183	68	14	670	51	24	1184	74	34	1750	37	44	2427	59
5	222	40	15	723	53	25	1232	48	35	1820	70	45	2469	42
6	289	67	16	761	38	26	1301	68	36	1870	49	46	2492	22
7	316	27	17	841	80	27	1367	66	37	1928	58	47	2554	62
8	366	50	18	894	54	28	1419	52	38	1979	51	48	2603	49
9	415	49	19	947	52	29	1499	80	39	2059	80	49	2646	44
10	465	50	20	978	31	30	1570	71	40	2139	80	50	2667	21

При заданном горизонте моделирования с использованием среднего значения итоговая наработка равняется 2500 км, что на 167 км меньше, чем с использованием закона нормального распределения в 1-ом цикле и на 145 км больше, чем во втором цикле. Разные результаты работы алгоритма позволяют проводить множество циклов моделирования с целью укрупнения выборки, на основе которой возможно определение потребности в принятии решения относительно замены или ремонта изделия. Определим среднее отклонение результатов моделирования (табл. 3.9).

Таблица 3.8 – Результаты моделирования (2-й цикл)

t, сут	E, км	e, км/сут	t, сут	E, км	e, км/сут	t, сут	E, км	e, км/сут	t, сут	E, км	e, км/сут	t, сут	E, км	e, км/сут
1	46	46	11	604	80	21	1001	54	31	1512	35	41	1969	40
2	88	42	12	635	31	22	1056	55	32	1592	80	42	2037	69
3	167	78	13	687	52	23	1116	60	33	1625	33	43	2058	20
4	195	28	14	708	22	24	1183	67	34	1683	57	44	2104	47
5	251	56	15	745	37	25	1217	34	35	1736	53	45	2138	33
6	279	29	16	777	32	26	1249	31	36	1790	55	46	2180	42
7	327	48	17	811	34	27	1328	79	37	1815	25	47	2225	45
8	402	75	18	861	50	28	1397	70	38	1849	33	48	2261	36
9	482	80	19	888	26	29	1439	41	39	1909	60	49	2298	37
10	523	41	20	947	59	30	1476	38	40	1929	21	50	2355	57

Таблица 3.9 – Сравнение результатов работы двух циклов моделирования

t, сут	e ₁ , км	e ₂ , км	Δe, км	t, сут	e ₁ , км	e ₂ , км	Δe, км
1	48	46	2	26	68	31	37
2	22	42	-20	27	66	79	-12
3	44	78	-34	28	52	70	-18
4	68	28	40	29	80	41	38
5	40	56	-16	30	71	38	34
6	67	29	38	31	54	35	19
7	27	48	-20	32	40	80	-40
8	50	75	-25	33	48	33	15
9	49	80	-31	34	37	57	-20
10	50	41	9	35	70	53	17
11	79	80	-1	36	49	55	-5
12	35	31	4	37	58	25	33
13	40	52	-12	38	51	33	18
14	51	22	29	39	80	60	20
15	53	37	16	40	80	21	59

16	38	32	5	41	78	40	39
17	80	34	46	42	73	69	4
18	54	50	4	43	78	20	58
19	52	26	26	44	59	47	12
20	31	59	-28	45	42	33	9
21	44	54	-9	46	22	42	-20
22	44	55	-11	47	62	45	18
23	44	60	-16	48	49	36	12
24	74	67	7	49	44	37	7
25	48	34	14	50	21	57	-36

Суммарное отклонение 313 км, максимальная разница в течении дня 59 км, что равно разнице между границами моделирования производительности ($e_{\max} - e_{\min}$). Следовательно, чем ближе концы интервала распределения наработки, тем стабильнее результаты работы алгоритма и ближе к значениям, получаемых при использовании средней наработки.

Для анализа достоверности работы алгоритма опробуем имитировать данные, полученные в ходе исследования работы перронного автобуса. Для укрупнения выборки проведём 20 циклов имитации с нахождением абсолютных и относительных отклонений каждого цикла в отдельности и средним значением всей имитации. Результаты моделирование приведены в таблице 3.10. Эталонное значение достоверной выборки 213072,6 км, горизонт моделирования – 1 год.

Таблица 3.10 – Сравнения результатов моделирования с исследованной выборкой

Цикл моделирования	Наработка на последний день	Абсолютное отклонение	Относительное отклонение
1	213076,1	3,5	0,0016%
2	213475,3	402,7	0,1890%
3	212761,8	-310,8	-0,1459%
4	213697,8	625,2	0,2934%
5	213013,8	-58,8	-0,0276%
6	212861,4	-211,2	-0,0991%
7	212997,8	-74,8	-0,0351%
8	212965,6	-107,1	-0,0502%
9	213258,8	186,2	0,0874%
10	212771,5	-301,1	-0,1413%
11	213270,6	198,0	0,0929%

12	213228,8	156,1	0,0733%
13	213366,1	293,5	0,1378%
14	212742,0	-330,6	-0,1552%
15	212816,1	-256,5	-0,1204%
16	213339,0	266,4	0,1250%
17	213239,8	167,2	0,0785%
18	213270,4	197,7	0,0928%
19	213455,0	382,3	0,1794%
20	213386,4	313,8	0,1473%
Среднее	213149,7	77,1	0,0362%

Максимальное отклонение в 625,2 км соответствует ошибке в 0,2934 процента, минимальное отклонение всего в 3,5 км или 0,0016 процента, среднее отклонение по 20 циклам моделирования равняется 77,1 км, что равняется ошибке моделирования в 0,0362 процента, что достаточно точно для симуляции работы передвижных транспортных средств.

Таким образом предлагается проводить каждодневную наработку узлов и агрегатов специальной автомобильной техники для прогнозирования моментов отказа.

3.4 Имитация отказов в зависимости от имитируемого значения текущей наработки

Имея алгоритм, который способен с достаточной точностью имитировать работу узлов и агрегатов специальной автомобильной техники в цифровом аналитическом виде необходимо решение задачи прогнозирования моментов отказа. В главе 3.2 была описана исследованная зависимость наработки изделий от назначенного и теоретически максимального ресурса. Используя информацию о распределении потока отказов возможно объединение его результатов с имитацией наработки путём исследования вероятности отказа изделия в каждый момент времени имитации. Так как для отдельно взятого узла $p_{\text{отк}} = f\left(\frac{E}{E_{\text{max}}}\right) E_{\text{max}} \rightarrow \text{const}$ функция вероятности отказа приобретает вид:

$$p_{\text{отк}} = f(E) \quad (3.28)$$

Значит данное выражение описывает значение вероятности отказа в момент времени t :

$$p_{\text{отк}t} = f(E_t) = \frac{2 \cdot E_{\text{наз}} \sqrt{E_{\text{наз}}} E_t}{E_{\text{наз}}} = \frac{2 \cdot E_{\text{наз}} \sqrt{E_{\text{наз}}} (E_{t-1} + \sum_{i=1}^n e_i \cdot p_i)}{E_{\text{наз}}} \quad (3.29)$$

где, $\sum_{i=1}^n e_i \cdot p_i$ – математическое ожидание от имитированного значения дневной наработки, n – количество циклов имитации;

$E_{t-1} + \sum_{i=1}^n e_i \cdot p_i$ – дневная производительность.

Подход к решению данной задачи основан на результатах многократного проведения имитационного моделирования наработки на отказ агрегатов техники, что позволило сформулировать эвристическое правило, применение которого позволит обеспечить решение задач по своевременной поставке запасных частей, техническому обслуживанию и ремонту техники. Для этого введём значение вероятности срабатывания шанса на отказ:

$$\alpha \in (0,1) \quad (3.30)$$

Значение вероятности срабатывания характеризует симуляцию отказа транспортного средства в момент его работы. Если значение вероятности срабатывания ниже значения вероятности отказа изделия модель использует результат сравнения как индикатор отказа.

$$p_{\text{отк}t} > \alpha_i \rightarrow i = \text{collapse} \quad (3.31)$$

Ввиду сущности имитационного моделирования значение α_i определяется в определённую итерацию моделирования наработки и никаким образом не зависит от состояния детали. Величина этого показателя определяется случайным образом, однако появляется вопрос, каким именно случайным образом должно выбираться это значение.

Природа генерации случайных чисел такова, что при генерации случайного числа в интервале $(0, 1)$ вероятность появления любого значения одинакова. Повышение вероятности отказа изделия связанная с повышением его наработки лишь сдвигает границу и увеличивает количество результатов генерации, за

которыми последует отказ детали. Если вводить логическое значение состояния работоспособности детали C как состояния отказа «0» или ложь, то состояние работоспособности «1» или истина. При применении бинарных логических высказываний промежуточные состояния невозможны. Тогда, вероятность работоспособности:

$$C_1 = f(\alpha, p_{\text{отк}}) \text{ если } \alpha \in (0, p_{\text{отк}}), \quad C_2 = f(\alpha, p_{\text{отк}}) \text{ если } \alpha \in (p_{\text{отк}}, 1)$$

$$\frac{\alpha}{p_{\text{отк}}} > 1 \rightarrow C = 1, \quad \frac{\alpha}{p_{\text{отк}}} < 1 \rightarrow C = 0$$

Воспользуемся разработанными алгоритмами для симуляции нескольких вариантов использования различных методов генерации случайных чисел вероятности срабатывания шансов на отказ. Исходные данные моделирования:

$E_0 = 0$ км, $e_{\min} = 40$ км, $e_{\max} = 60$ км, $E_{\text{наз}} = 5000$ км, $\sum n_i = 1000$ циклов, генерация случайных значений вероятности срабатывания шанса на отказ – случайная. Результаты моделирования на диаграмме на рисунке 3.16.

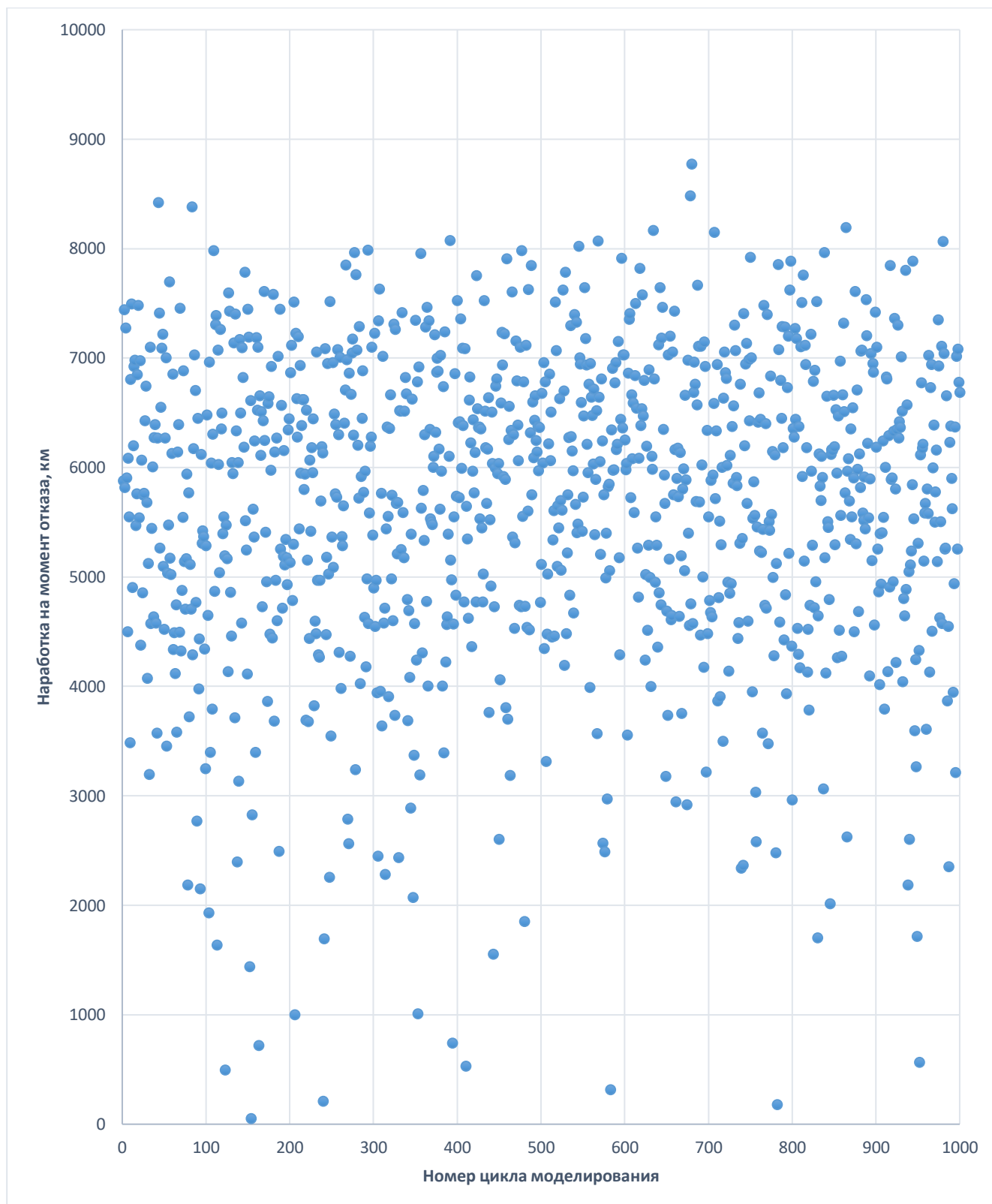


Рисунок 3.16 – Результаты моделирования отказов изделий при случайной генерации значений вероятности срабатывания шанса на отказ.

Средняя наработка по всем циклам имитации $\overline{E_{\text{отк}}} = 5673,6$ км, средняя продолжительность имитации $\overline{T_{\text{отк}}} = 113,4$ сут, среднее значение вероятности

отказа при срабатывании вероятности шанса на отказ $\overline{p_{\text{отк}}} = 0,0427$, количество циклов имитации, в которых изделия не преодолели назначенный ресурс – 284 циклов, обратный результат – 716 циклов. Диаграмма частот отказов от наработки приведена на рисунке 3.17.

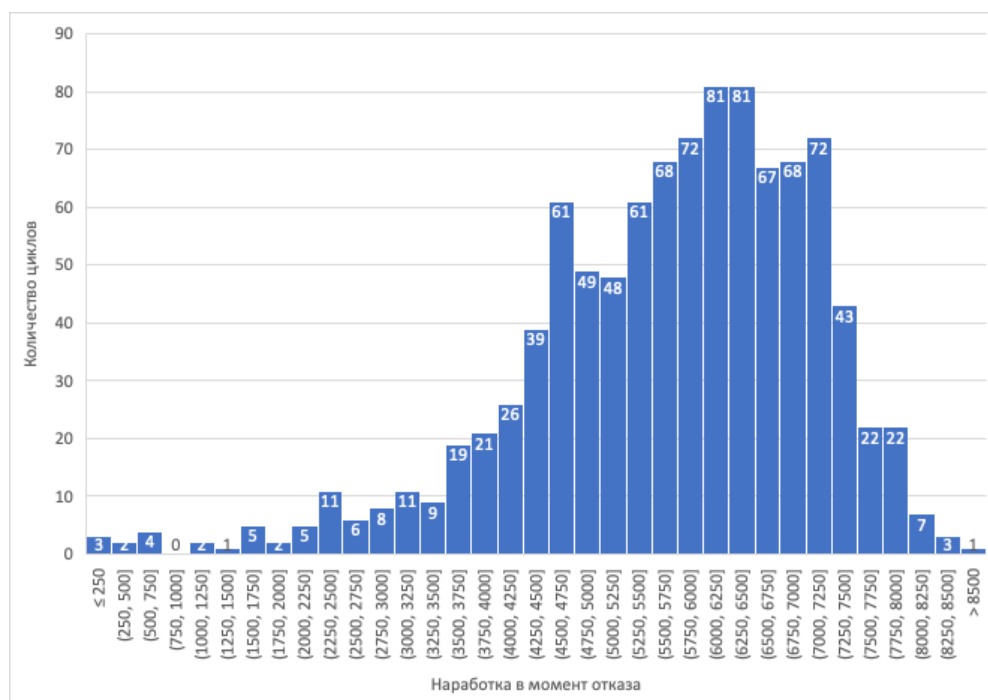


Рисунок 3.17 – Частоты отказов при случайной генерации значений вероятности срабатывания шанса на отказ.

Полученные в ходе моделирования данные противоречат собранной статистике отказов в зависимости от назначенного ресурса. Процент циклов имитации, в которых отказ случился ранее назначенного ресурса 28%, что равнозначно проценту отказа 28% деталей из выборки в 1000 изделий (рис. 3.18). Среднее значение процента наработки в момент отказа составляет 113%. Максимальный процент 175%.

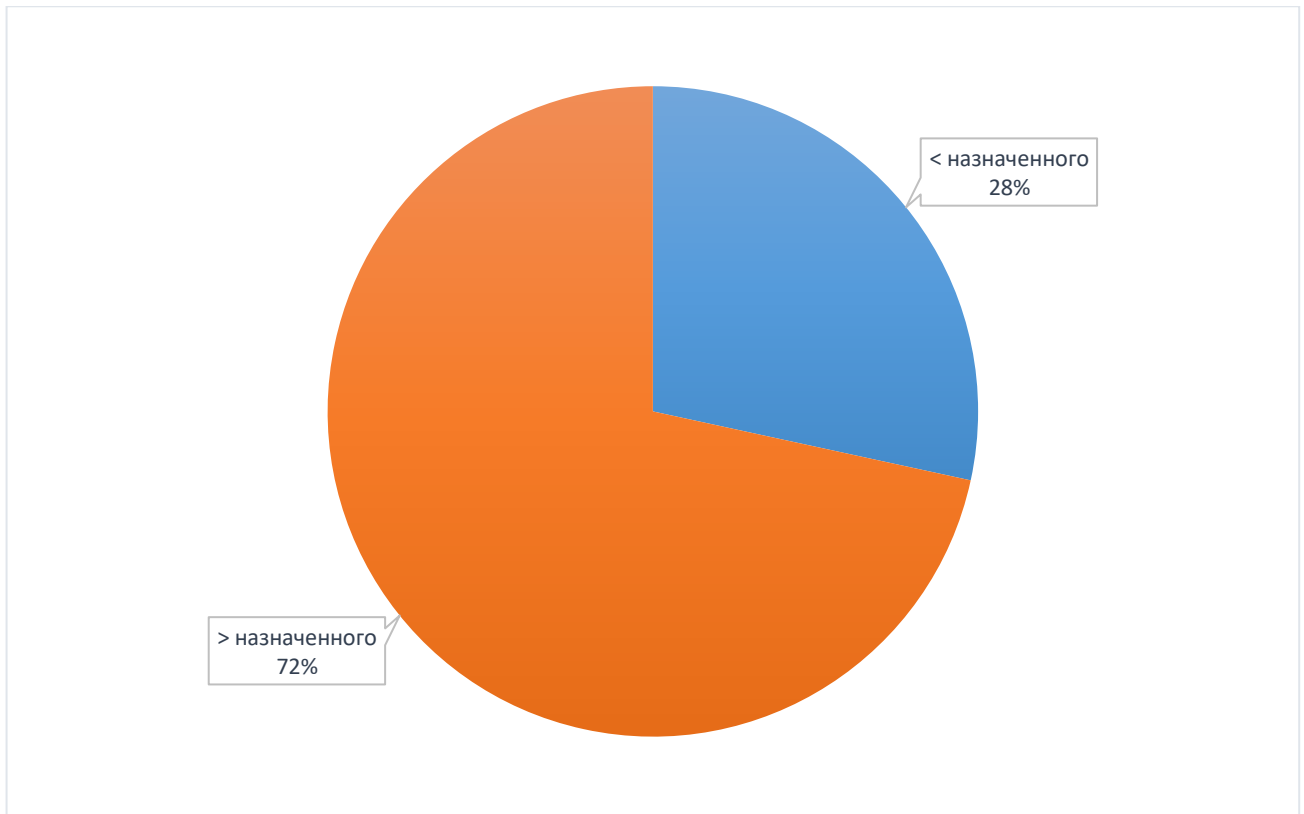


Рисунок 3.18 – Соотношение отказов до преодоления назначенного ресурса

Наиболее частые отказы происходили в промежутке от 6000 до 6500 км, что равняется 120% – 130%. Последующие уменьшение частот отказов следует из-за высокого значения вероятности отказа в предыдущих интервалах. Из-за необходимости вычисления шанса каждую итерацию вероятность достижения дальнейших дней уменьшается экспоненциально.

$$P_{\text{отк}T} = P_{\text{отк}T-1} \cdot p_{\text{отк}t} \quad (3.32)$$

Тогда:

$$P_{\text{отк}1} = P_{\text{отк}0} \cdot p_{\text{отк}1} = p_{\text{отк}E_0} \cdot p_{\text{отк}E_1} \quad (3.33)$$

$$P_{\text{отк}T} = \prod_{t=1}^T p_{\text{безотк}E_{t-1}} \cdot p_{\text{отк}E_T} \quad (3.34)$$

Опробуем использование другого распределения вероятности срабатывания шанса на отказ α . Сконструируем распределение, с такими же средним значением наработки при отказе, но более ужатого по рамкам экстремальных значений. Такое распределение будет нормальным относительно своего среднего значения. Результаты моделирования с аналогичными данными приведены на рисунке 3.19.

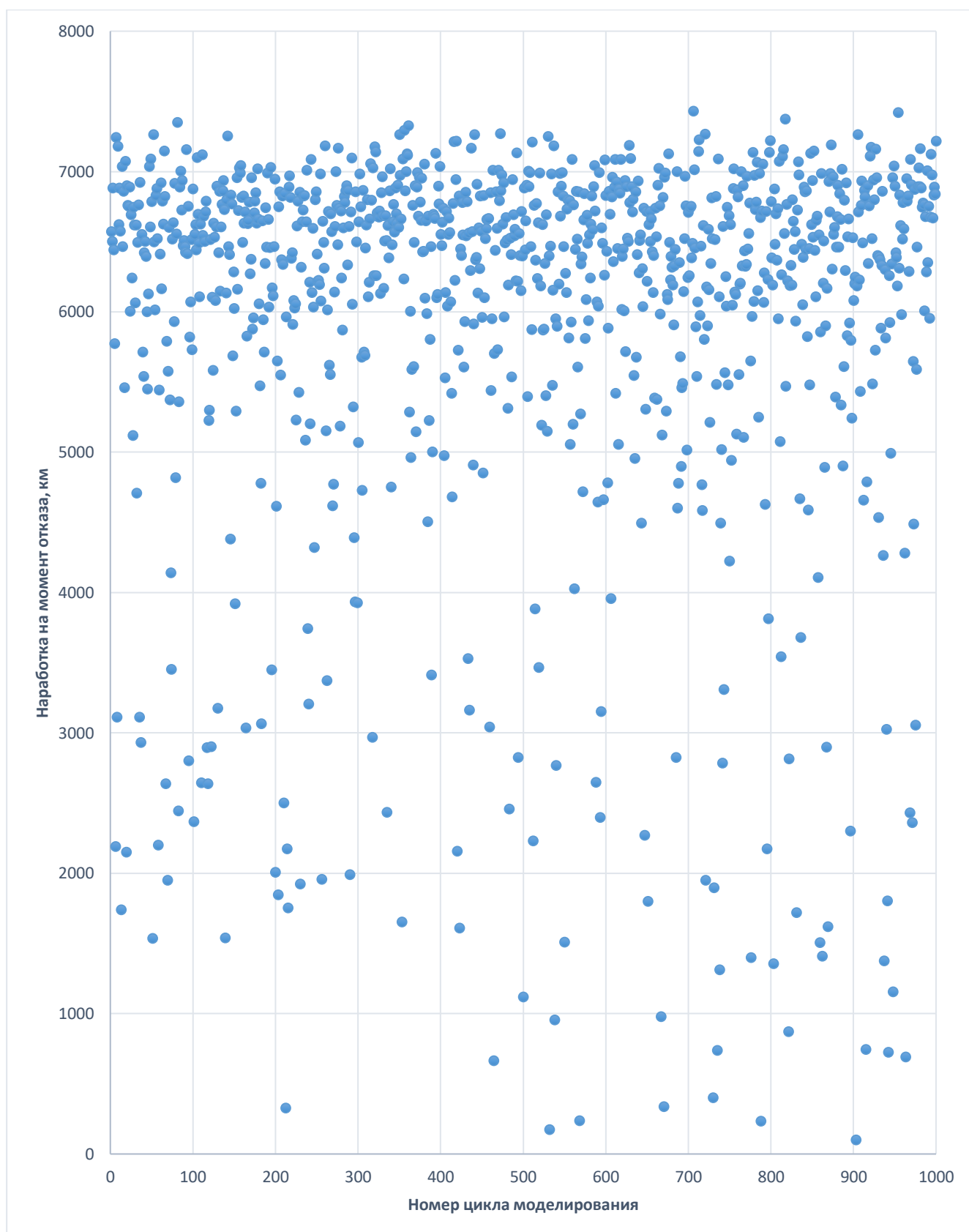


Рисунок 3.19 – Результаты моделирования отказов изделий при нормальной генерации значений вероятности срабатывания шанса на отказ.

При нормальном распределении большинство отказов наступают в один и тот же момент, в то же время существует небольшое количество ранних и преждевременных отказов, соответствующих потенциальному браку изделий.

Средняя наработка по всем циклам имитации $\overline{E}_{\text{отк}} = 5661,1$ км, средняя продолжительность имитации $\overline{T}_{\text{отк}} = 119,2$ сут, среднее значение вероятности отказа при срабатывании вероятности шанса на отказ $\overline{p}_{\text{отк}} = 0,0465$, количество циклов имитации, в которых изделия не преодолели назначенный ресурс – 147 циклов, обратный результат – 716 циклов. Диаграмма частот отказов от наработки приведена на рисунке 3.20.

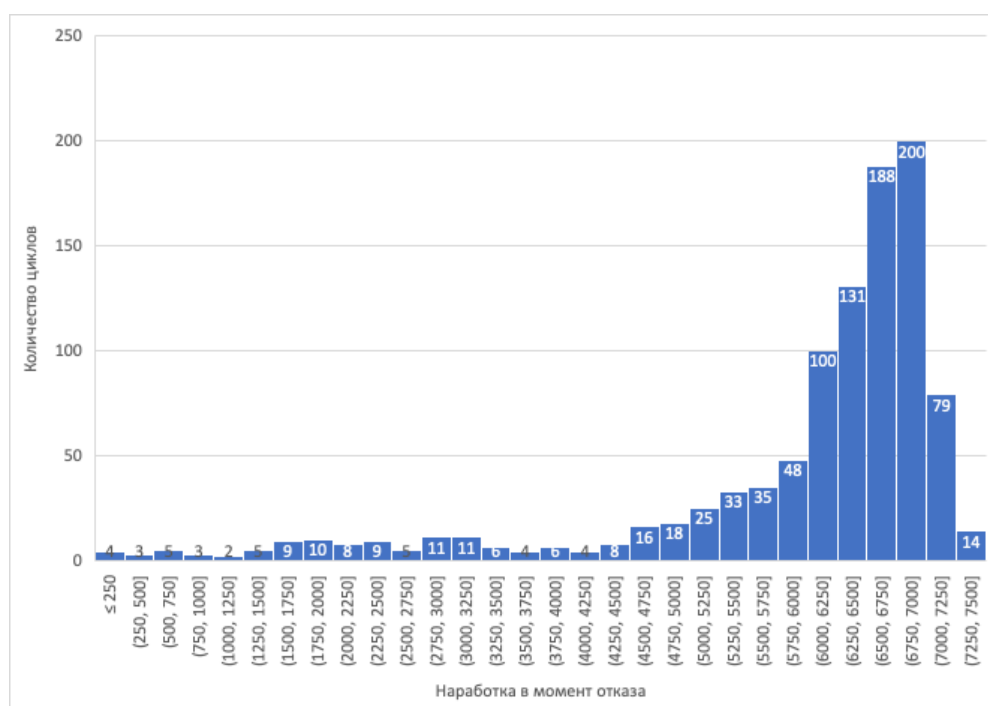


Рисунок 3.20 – Частоты отказов при нормальной генерации значений вероятности срабатывания шанса на отказ.

Полученное распределение соответствует исследованной зависимости количества отказов от процента выработки ресурса, полученной в главе 3.2. Такое распределение более чётко отражает характер отказов. 14% имитированных

изделий отказали раньше достижения назначенного ресурса изделия, наиболее распространённая величина коэффициента выработки ресурса при отказе 1,3.

Таким образом, можно сделать вывод о работоспособности алгоритма моделирования наработки изделия с целью определения моментов отказа. При наличии данных о распределении отказов для конкретного вида изделий, эксплуатируемых на предприятии, используемые функции определения вероятности отказов могут быть откалиброваны для учёта специфики практики определённых агрегатов. Подход имитационного моделирования позволяет анализировать крупную выборку данных для установления более точных результатов.

Разработанный алгоритм позволяет прогнозировать момент отказа деталей, однако учитывая специфику рассматриваемых агрегатов специальной автомобильной техники для реализации логистической концепции «точно в срок» для запасных деталей аэропортов МАУ необходима интеграция данного алгоритма в систему поддержки принятия решений и снабжения предприятий. Для эффективности его применения необходимо оценить возможности и сущность процесса поставки запасных частей. Организационно-логистические основы такой системы снабжения были сформированы автором на предыдущем этапе исследования [206].

3.5 Система определения моментов необходимости заказа и прибытия запасных частей

Достаточно точно определив момент отказа для реализации концепции «точно в срок» необходимо также определить момент, в который должно быть принято решение о закупке новых запасных частей на замену отказавшим узлам. Ввиду случайной составляющей отказов такие даты не могут быть определены с достоверной точностью и всегда являются интервалами. Использование средних значений приводит к возможным простоям в ожидании потребных частей.

Для выбора даты закупки необходима информация о поставщиках необходимых компонентов, более конкретно данные о сроках поставки. Ввиду географического расположения таких контрагентов в отдалённых частях света (Индия, Китай) точные сроки, также, как и точный момент отказа, неизвестны. Срок доставки зависит от множества внешних факторов, таких как транспортно-технологическая схема поставки, текущей мировой транспортной ситуации, возможностей своевременной оплаты, надёжности маршрута поставки и т.д. На предприятиях зачастую поставщики предоставляют информацию об интервалах поставки в формате «от и до». Для более надёжной реализации поставок наиболее рациональным решением будет основываться на данных максимальных сроках, так как простой в ожидании поставки запасных частей намного более убыточен, чем прибытие изделий заблаговременно до момента отказа.

Рассмотрим несколько способов реализации вычисления моментов приобретения запасных частей.

Первый способ предоставляет полный контроль над поставками разработанной модели. Заключается в закупке и начале поставки деталей к моменту среднего срока до отказа детали:

$$T_{\text{зак}} = T_{\text{отк}} - t_{\text{пост}} \quad (3.35)$$

где, $T_{\text{зак}}$ – момент принятия решения о поставке, сут после начала моделирования;

$T_{\text{отк}}$ – момент отказа, сут после начала моделирования;

$t_{\text{пост}}$ – время всей транспортировки запасных частей от момента принятия решения о поставке до отгрузки на склад грузополучателя

$$t_{\text{пост}} = \sum_i t_i \quad (3.36)$$

где, t_i – i -ая составляющая процесса транспортировки (время погрузки, время доставки, время прохождения таможи и т.п.)

Пусть время всей транспортировки $t_{\text{пост}} = 30$ сут, тогда для рассмотренного примера с нормальной генерацией значений вероятности срабатывания шанса на отказ при $T_{\text{отк}} = 119,2$ сут:

$$T_{\text{зак}} = 120 - 30 = 90 \text{ сут}$$

Графически объём захваченных деталей приведён на рисунке 3.21.

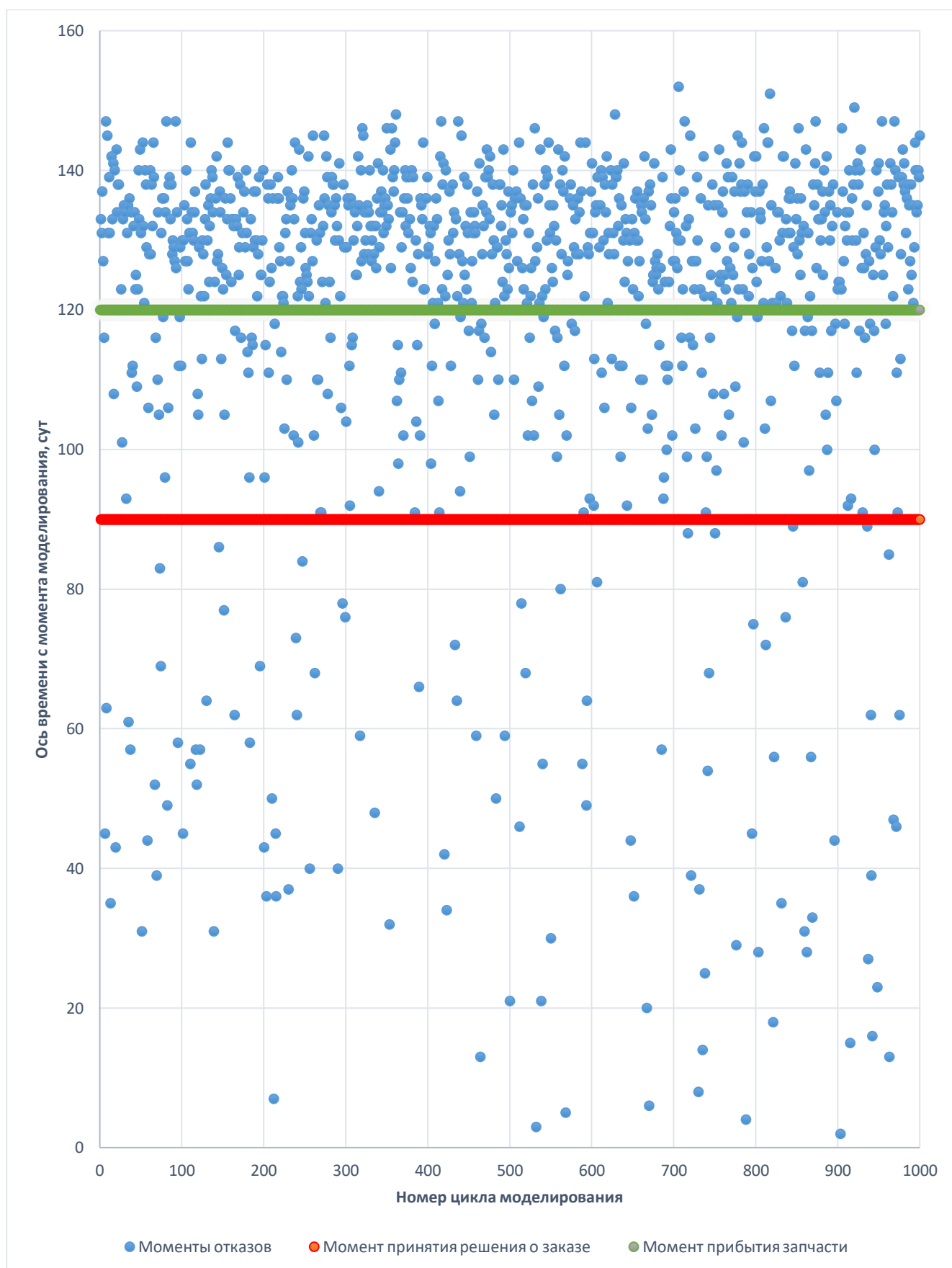


Рисунок 3.21 – График, учитывающий время поставки деталей при использовании среднего времени отказа

Все отказы, произошедшие ниже зелёной линии, обозначающий момент времени, когда запасная часть прибыла на предприятие, приводят к простоя, равному перпендикуляру между точкой отказа и линией момента прибытия. Отказы ниже красной линии, означающей момент принятия решения о заказе запасной части означают, что при такой поломке заказ был бы произведён раньше и время простоя в ожидании равнялось времени доставки.

Всего не было спрогнозировано 278 отказов, что равняется 27,8% выборки. Среднее время простоя в ожидании поставки запасных частей при таком сценарии $\overline{T_{\text{простоя}}} = 19,26$ сут, из которых 111 изделий ожидали полный цикл поставки 30 сут. Для изделий, момент отказа которых был спрогнозирован неверно среднее время простоя в ожидании поставки запасных частей $\overline{T_{\text{простоя}}} = 12,12$ сут. Всего верно было спрогнозировано 722 отказа. Средняя ошибка моделирования 13,18 сут.

Второй подход, установка определённого значения коэффициента верно спрогнозированных отказов. Путём предварительной стандартизации допуска количества не спрогнозированных отказов возможно найти значение момента времени, в которое необходимо принять решение о заказе, чтобы не допустить превышение установленной нормы.

$$K_{\text{доп}} = \frac{n_{\text{отк}}}{N} \quad (3.37)$$

где, $n_{\text{отк}}$ – количество не спрогнозированных отказов;

N – общий размер выборки.

Пусть $K_{\text{доп}} = 0,1$, тогда количество деталей, отказ которых можно допустить $n_{\text{отк}} = 100$ шт. При заданном параметре допуска график предоставлен на рисунке 3.22.

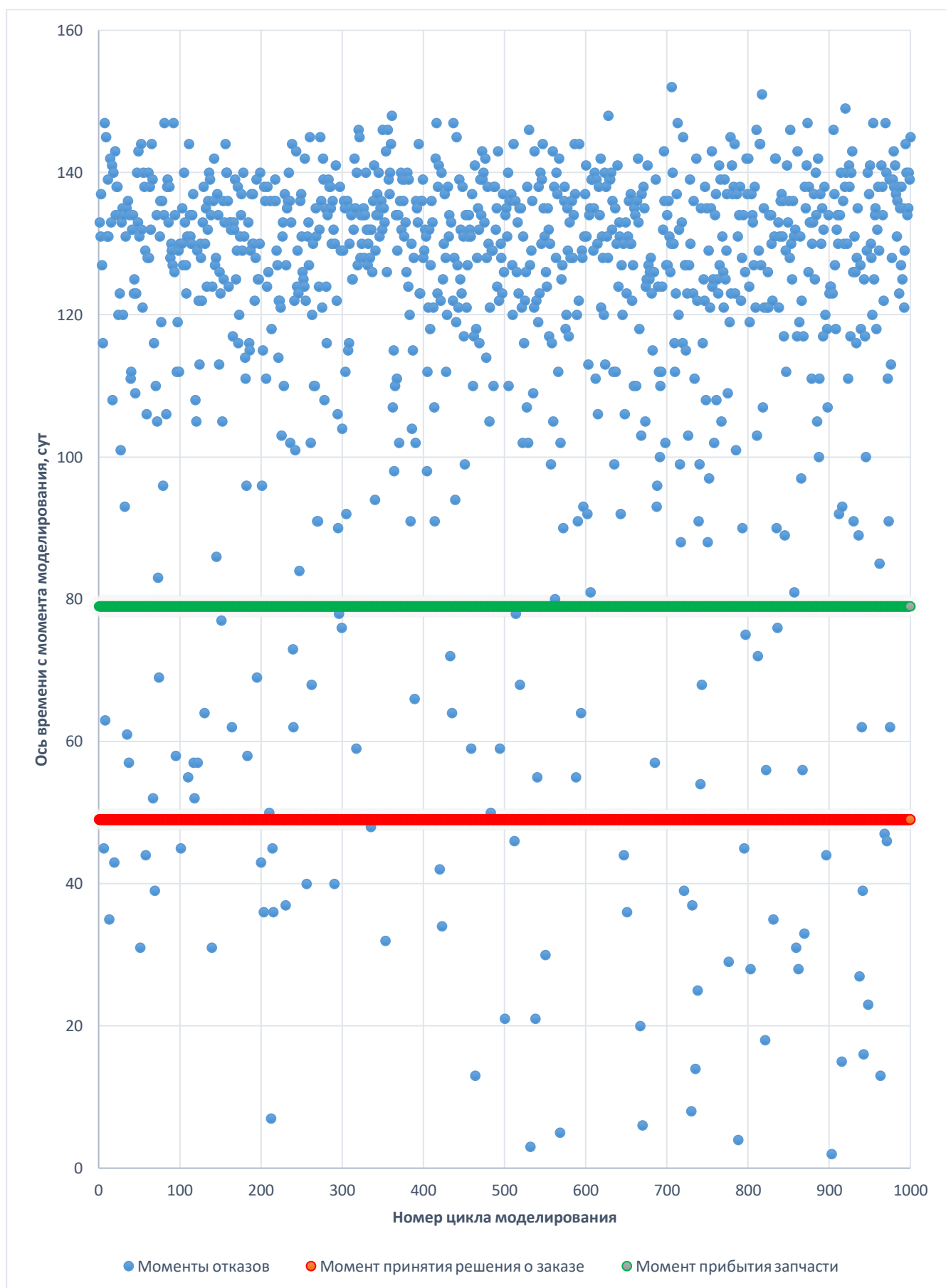


Рисунок 3.22 – График, учитывающий время поставки деталей при использовании коэффициента допуска

Количество деталей, для которых момент отказа был спрогнозирован неверно, 43 штуки, среднее время простоя в ожидании поставки запасных частей $\overline{T_{\text{простоя}}} = 16,09$ сут, для всех 100 не спрогнозированных отказов $\overline{T_{\text{простоя}}} = 24,02$ сут. Всего корректных прогнозов 900 шт, средняя ошибка моделирования 48,5 сут.

Имея статистические данные о количестве и верности прогнозов возможно перевести данные в вероятностные характеристики. Результаты моделирования обоих подходов приведены в таблице 3.11. Ошибка моделирования при отказе во время поставки, критическая ошибка, отказ до момента принятия решения о поставке.

Таблица 3.11 – Результаты моделирования 1000 деталей

Категория	Средний момент отказа	Коэффициент допуска
Вероятность верного прогноза	0,722	0,900
Вероятность ошибки	0,167	0,043
Вероятность критической ошибки	0,111	0,057
Среднее время простоя при ошибке, сут	12,12	16,09
Среднее время простоя при критической ошибке, сут	30,00	30,00
Среднее время простоя при неверном прогнозе, сут	19,16	24,02

Среднее время простоя запасной части в ожидании отказа, сут	13,18	48,5
---	-------	------

Общее время простоя при 1000 циклах моделирования для разных стратегий приведено в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Общие результаты времени простоя моделирования 1000 деталей

Категория	Средний момент отказа	Коэффициент допуска
Общее время простоя ТС в ожидании запасных частей, сут	5 354	2 402
Общее время простоя запасных частей в ожидании отказа, сут	9 280	43 650

Для определения оптимального коэффициента допуска необходимо указать функцию убытков от простоя ТС в ожидании запасных частей и убытков от преждевременного прибытия запасных частей. Как было описано в главе 2 убытки от простоя ТС значительно превышают убытки от преждевременной поставки. Функция убытков приобретает вид:

$$Y = f(T_1, T_2) = k_1 \cdot T_1 + k_2 \cdot T_2 \quad (3.38)$$

где, T_1, T_2 – количество дней простоя в ожидании поставки и в ожидании отказа соответственно;

k_1, k_2 – убытки от одного дня простоя для простоя в ожидании поставки и в ожидании отказа соответственно.

Очевидно, что значения подхода со средним моментом отказа тождественно ситуации моделирования коэффициентом допуска при $K_{\text{доп}} = 0,278$. Так же очевидно, что от значения $K_{\text{доп}}$ зависят показатели количества дней простоя.

$$T_1 = f(K_{\text{доп}}) \quad T_2 = f(K_{\text{доп}}) \quad (3.39)$$

Тогда при известных значения k_1, k_2 возможно оптимизировать значения убытков с целью нахождения значения $K_{\text{доп}}$ при котором убытки будут минимальны. При повышении значения допуска увеличивается количество дней простоя в ожидании запасных частей, ведь растёт количество не верных прогнозов.

Рассмотрим количество отказов на день имитации (рис. 3.23).

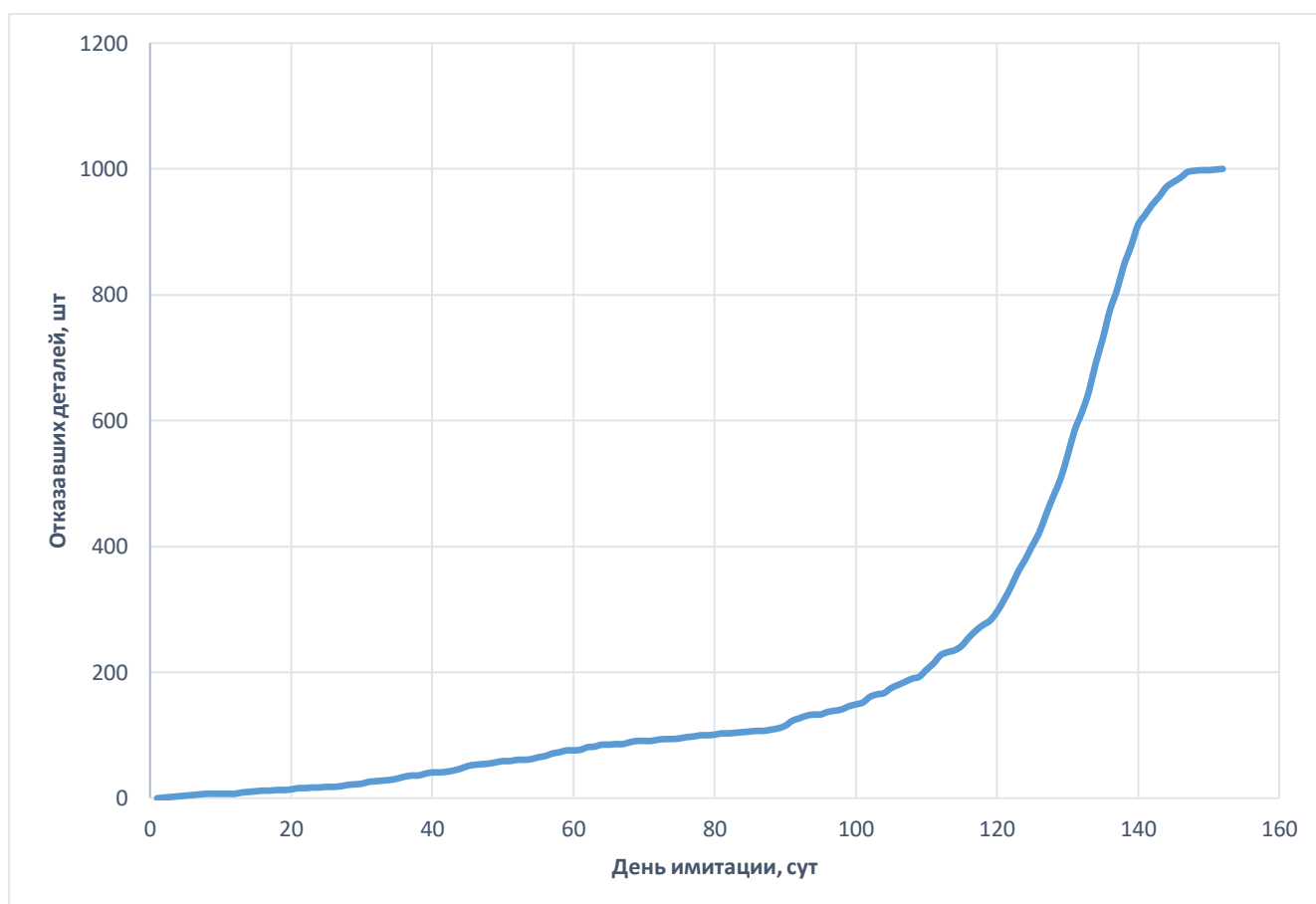


Рисунок 3.23 – Количество отказов на заданный день имитации

При принятии решения о закупке запасных частей в момент поломки (то есть без учёта информации о моделировании) и $k_1 = 5k_2$ график функции убытков показан на рисунке 3.24. Для сравнения влияния отношения k_1 к k_2 рассмотрим ещё несколько вариантов. График для $k_1 = 20k_2$ приведён на рисунке 3.25, а график для $k_1 = 50k_2$ на рисунке 3.26.

При повышении отношения k_1 к k_2 наблюдается значительное сглаживание участка до момента времени высокого повышения потока отказов, в то время как

при уменьшении данного отношения сглаживается, наоборот, участок высокой интенсивности отказов. Оптимальный момент прибытия запасных частей на предприятия колеблется в районе от 100 до 130 суток с момента имитации. Данный участок характеризуется значительным повышением суточного количества отказов.

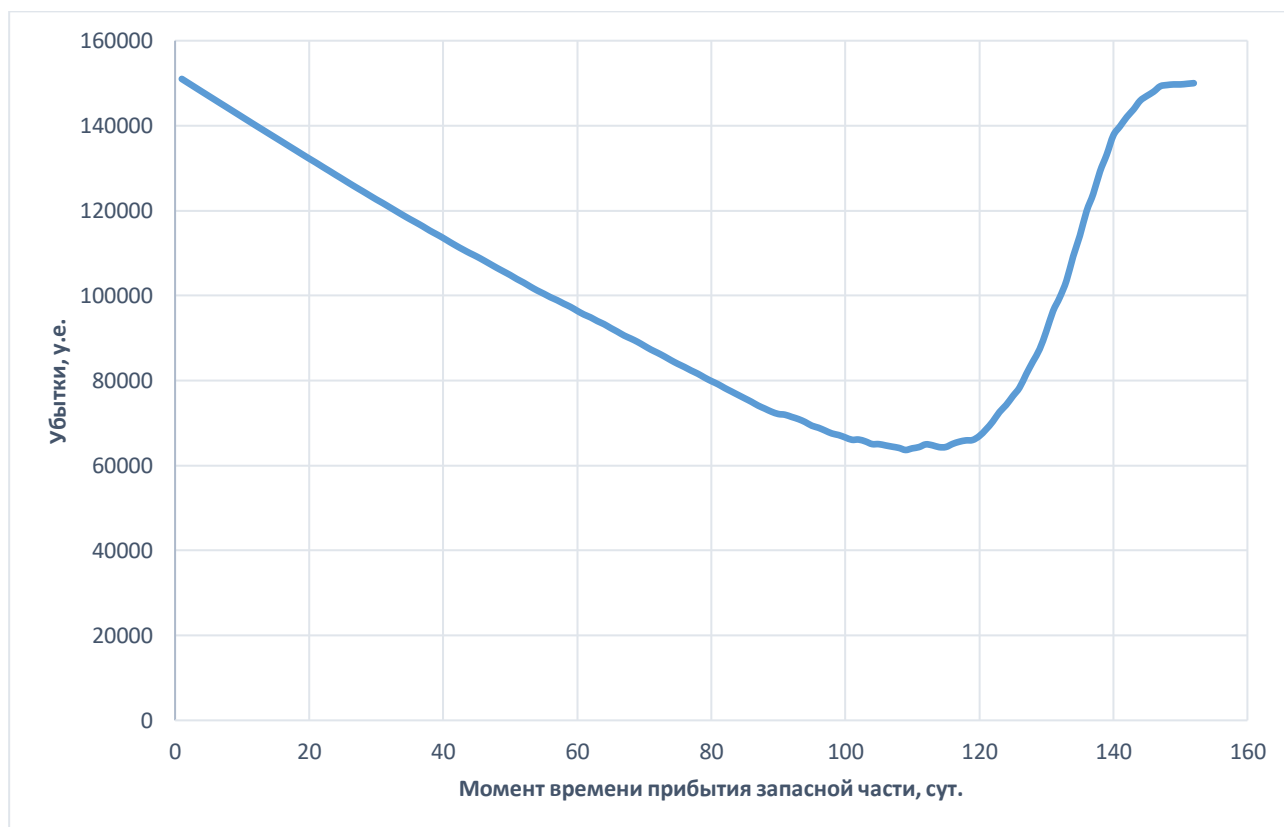


Рисунок 3.24 – Убытки в условных единицах при $k_1 = 5k_2$

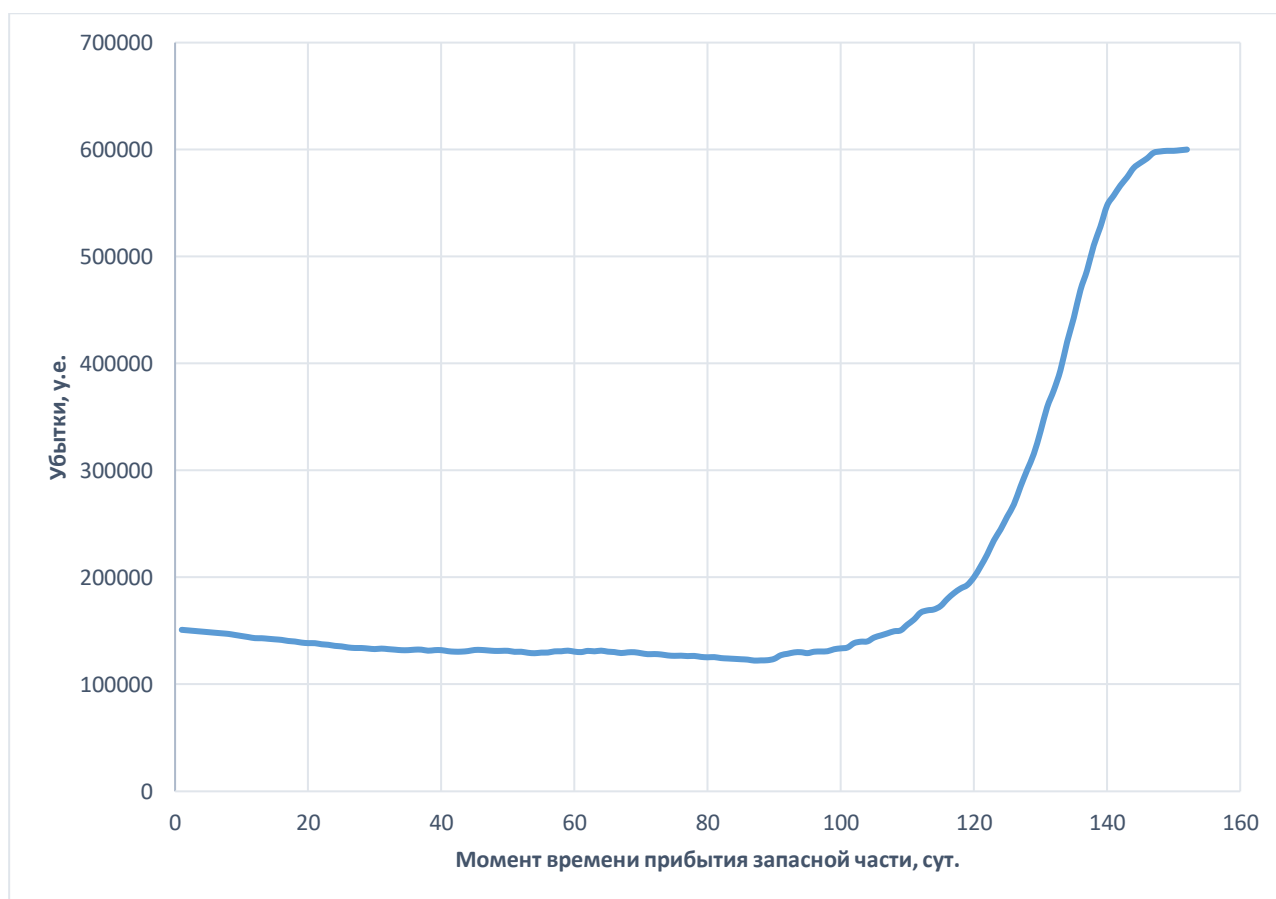


Рисунок 3.25 – Убытки в условных единицах при $k_1 = 20k_2$

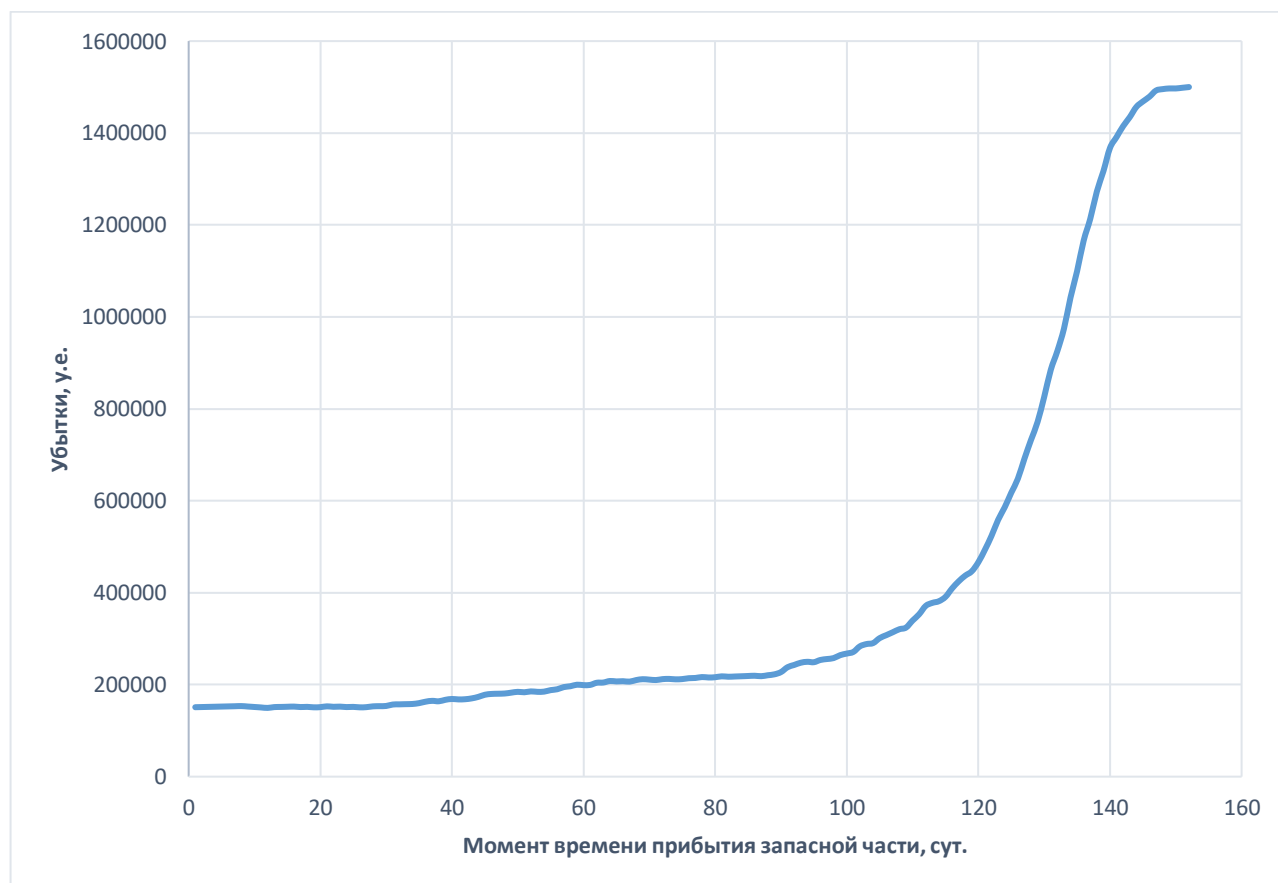


Рисунок 3.26 – Убытки в условных единицах при $k_1 = 50k_2$

Тогда оптимальное значение коэффициента допуска $K_{\text{доп}}$ принадлежит участкам, характеризующимся минимальным значением убытков. Используя значение $K_{\text{доп}}$ возможно определение момента времени прибытия запасной части для удовлетворения данного значения вероятности верного прогноза. Имея информацию сроках поставки от разных поставщиков возможно определить дату заказа потребных деталей.

Для анализа значений простоя, получаемых с использованием различных коэффициентов допуска логично рассмотреть простои при отказе изделия в различные моменты времени. Согласно данным моделирования количество дней простоя при одновременном заказе приведено на рисунке 3.27.

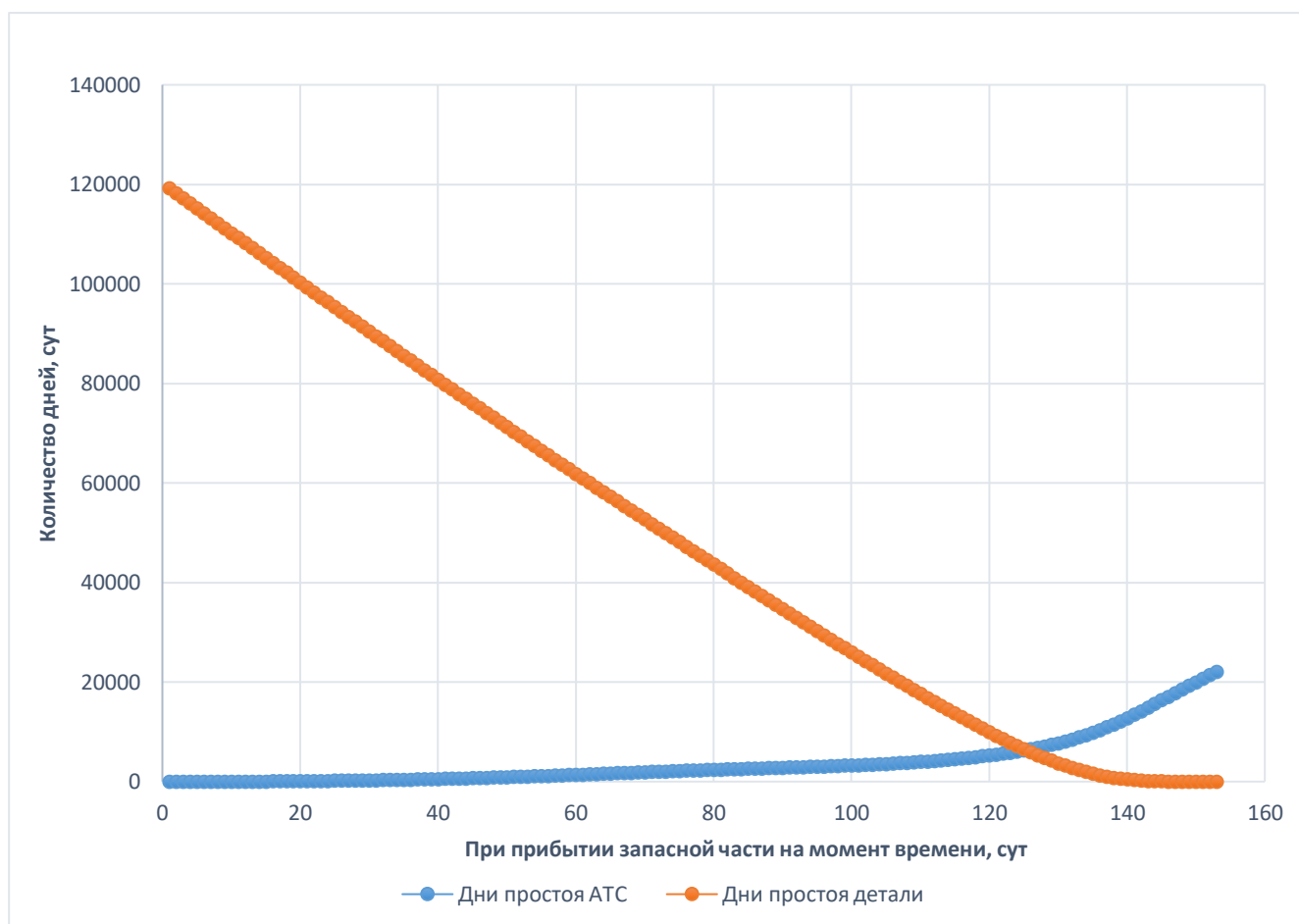


Рисунок 3.27 – Количество дней простоя по результатам моделирования

На графике наблюдается значительно снижение количества дней простоя запасной части при отсрочивании заказа, и медленное повышение количества дней простоя специальной автомобильной техники в ожидании прибытия запасных

частей. При оценке убытков от данного ожидания графики функция складываются с учётом выбранных значений k_1 к k_2 с получением функции убытков. Рассмотрим более показательное соотношение $k_1 = 5k_2$ и сравним результаты моделирования с использованием стратегии закупки запасных частей при в момент отказа. Сравнение приведено на рисунке 3.28.

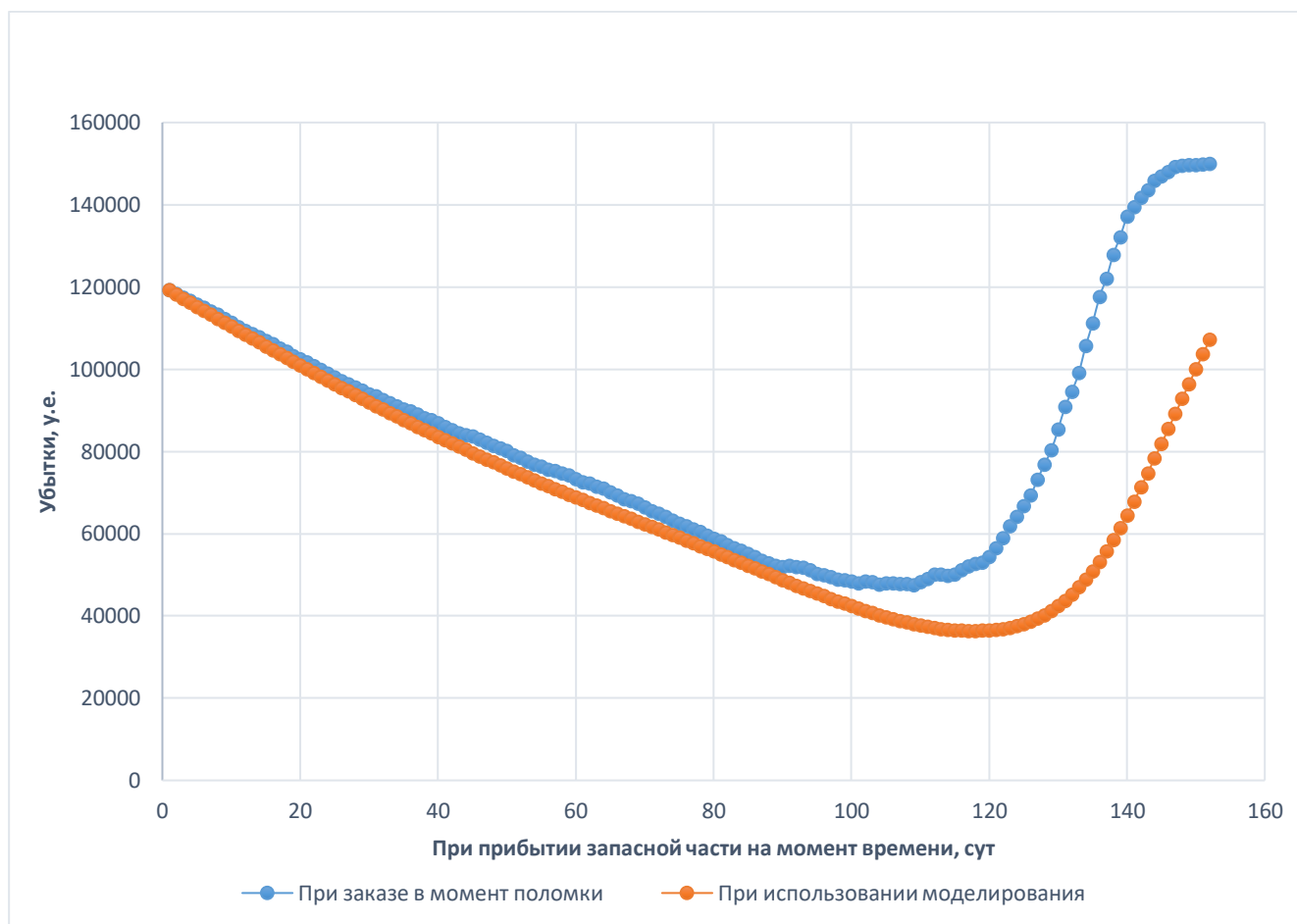


Рисунок 3.28 – Сравнение убытков при различных подходах к снабжению

Из-за прогнозирования отказов кривая значения убытков более сглажена и значения убытков от простоя специальной автомобильной техники снижаются ввиду постепенного нарастания количества дней простоя. Минимальное значение убытков соответствует 117 дню прибытия запасных частей на производство, потери 36 347 у.е., а при конвенциональном значении минимальных убытков равно 47 415 у.е. Использование имитационного моделирования позволило снизить вероятные расходы на 11 068 у.е. или на 23,34%. Данное значение достигается при использовании $K_{доп} = 0,255$, что означает вероятность ошибки моделирования 25%.

Помимо уменьшения потенциальных убытков, использование имитационного моделирования способствует упрощению задачи выбора поставщиков – ввиду устранения одного критерия многокритериальной задачи принятия решения. При отказе агрегата специальной автомобильной техники скорость доставки является ключевым фактором, ведь каждый дополнительный день транспортировки приводит к дополнительному простоем автотранспорта в ожидании ремонта.

Выводы по третьей главе

1. Разработаны требования к имитационной модели прогнозирования отказа узлов специальных транспортных средств, составлен алгоритм работы данной модели, состав входных и выходных данных, требования к точности моделирования и прогноза, учёта вероятностного характера отказов, возможности аналитической обработки полученных значений, влияние неопределённых факторов внешней среды, требования к составу информации, полученной от технической и логистической служб предприятия, эксплуатирующего данную модель.

2. Определена зависимость вероятности отказа узлов или изделий, установленных на специальной автомобильной технике в аэропортах МАУ, приведена возможность отказа от определённых единиц измерения для имитационного подхода к системам, подчинённых разным родам эксплуатации, экспериментально получены значения наработки на отказ для различных агрегатов, 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 изменений функции специальной автомобильной техники 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.

3. 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 МАУ на примере перронного автобуса Neoplan P84 N9122L Apron № 105163 аэропорта Домодедово, было проведено пробное моделирование для сравнения результатов разработанного алгоритма с реальными значениями, максимальная ошибка моделирования наработки не превышает 5%, что свидетельствует о работоспособности алгоритма и возможности его применения на практике.

4. Разработана модель имитации отказов на основе вероятности отказа, определяемого с помощью зависимости вероятности отказа узлов или изделий, установленных на специальной автомобильной технике в аэропортах МАУ от отношения текущей наработки к назначенному ресурсу изделий при имитационном моделировании наработки, была определена нормальная сущность вероятности проявления отказа, зависимость определения отказа внедрена в модель имитации наработки с целью определения моментов времени отказа от даты начала моделирования, разработана последовательность превращения статистических значений, полученных посредством проведения множества циклов моделирования, к вероятностным значениям отказа конкретных моделируемых узлов, исследованы несколько подходов к моделированию, с использованием средних значений алгоритма и установленным значением субъективного коэффициента допуска, предложен вариант определения оптимального значения коэффициента допуска для минимизации убытков предприятия. Экспериментально установлено, что после порога в 80% наблюдается значительное увеличение потока отказов элементов, связанное с приближением к выработке ресурса. Доказано, что отказы в зоне от 20% до 80% не связаны с качеством самого изделия, а вызваны условиями эксплуатации агрегатов специальной автомобильной техники.

5. Продемонстрирован пример использования имитационного моделирования для реализации логистической концепции «точно в срок» для доставки запасных частей для узлов и агрегатов специальной автомобильной

техники в аэропортах МАУ, предложены методы расчёта средне ожидаемых простоев автотранспорта в ожидании ремонта и запасных частей в ожидании отказа, рассчитаны вероятности ошибки моделирования (25%) и средний ожидаемый результат моделирования. Экспериментально доказано, что использование имитационного моделирования позволяет снизить вероятные расходы на 23,34%.

4 РАЗРАБОТКА ПРИКЛАДНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО ИМИТАЦИОННОГО АППАРАТА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАРАБОТКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ

4.1 Выбор вида программного обеспечения для имитационного моделирования.

Ввиду высокой степени влияния результатов моделирования случайных событий малый набор входных данных раскрывается как огромное количество случайных, но подчинённых составленным законам распределения, величин. Прикладное использование и выбор значений данных переменных представляется невозможным с точки зрения ручного подхода, так как понадобится не один месяц, чтобы произвести имитацию на несколько месяцев вперёд, а вероятностная составляющая отказов может наступить задолго до конца расчёта. Тем более, когда речь идёт не об одном конкретном узле, а о множестве.

Компьютерное моделирование облегчило моделирование сложных систем, основными характеристиками которых являются функции, которые они выполняют, их структура и поведение во времени. В зависимости от того, какой аспект моделируется, различают функциональное, информационное и поведенческое (событийное) моделирование.

Функциональные модели отражают функции, функциональные подсистемы, взаимосвязи между ними. Информационные модели описывают состав элементов систем и взаимосвязи между ними.

Поведенческие модели отражают динамику функционирования системы, в них присутствуют следующие категории: событие, состояние системы, переход из одного состояния в другое, последовательность событий, условия перехода.

В настоящее время моделирование заняло главенствующее место в теории познания, приобрело общенаучный характер и применяется учеными для исследования природы, в науках о человеке, обществе, а также в разработках новых технических средств. Такое широкое его использование объясняется существенной экономией времени, средств и сил, возможностью исправить ошибки, которые очень сложно исправить при наличии уже созданного объекта.

Усовершенствованная классификационная схема видов моделирования облегчает восприятие накопленного опыта, позволяет обоснованно определиться с видом моделирования при проведении научного исследования.

На практике моделирование зачастую выполняется с использованием вычислительных машин, будь то обычные стационарные рабочие компьютеры или специализированные профессиональные сервера, созданные под выполнение конкретных задач. Архитектура таких рабочих станций варьируется в зависимости от требований эксплуатирующей их системы, однако математический принцип работы идентичен.

Для моделирования систем используются как универсальные и процедурно-ориентированные языки общего назначения (ЯОН), так и специализированные языки имитационного моделирования (ЯИМ). При этом ЯОН предоставляют программисту-разработчику модели больше возможностей в смысле гибкости разработки, отладки и использования модели. Но гибкость приобретается ценой больших усилий, затрачиваемых на программирование модели, так как организация выполнения операций, отсчет системного времени и контроль хода вычислений существенно усложняются.

Имеющиеся ЯИМ можно разбить на три основные группы, соответствующие трем типам математических схем: непрерывные, дискретные и комбинированные. Языки каждой группы предназначены для соответствующего представления системы S' при создании ее машинной модели.

В некоторых языках можно четко разделить модель и данные.

ЯИМ также могут функционировать с добавлением командного интерпретатора для обеспечения последовательности действий с соответствующими файлами. Командный язык позволяет не учитывать детали работы того или иного модуля и обеспечить корректную работу по моделированию ситуации. При осуществлении моделирования важно предусмотреть возможность использования разработанной модели для различных запасных частей. Важно учитывать, что применение командного языка обеспечивается за счёт ранее заданных значений и параметров.

В современных приложениях математического программирования, как правило, применяется командный язык из-за более достоверных результатов. Кроме того, эти задачи естественно выражаются в обычной алгебраической нотации и существуют эффективные модули для решения получаемых моделей [180, 181].

Для подбора необходимого уровня исполнения вычислительной модели стоит руководствоваться сложностью алгоритма. Как правило, эффективность алгоритма можно оценить по тому, сколько времени потребуется для его работы в зависимости от размера входных данных. Например, эффективность графового алгоритма можно измерить как функцию числа вершин или ребер входного графа. Итак, алгоритм Эйлера находит эйлерову схему после примерно m шагов, где m — количество ребер во входном графе.

При рассмотрении эффективности алгоритма мы всегда рассматриваем наихудший случай. Например, проблема Гамильтонова цикла может быть решена примерно за $n!$ шагов, рассматривая все возможные схемы. Всегда есть вероятность обнаружить его с первого раза, но на практике для оценки сложности предполагается худший случай.

Для оценки времени работы алгоритма от входных данных была разработана классификация «Big O» – градация сложности [182]. Классические примеры сложности приведены в таблице 4.1 по возрастанию сложности.

Таблица 4.1 – Градация сложности алгоритмов

Класс сложности	Название
$O(1)$	Постоянная
$O(\log n)$	Логарифмическая
$O(n)$	Линейная
$O(n \cdot \log n)$	Линейно-логарифмическая
$O(n^c)$	Показательная
$O(c^n)$	Экспоненциальная
$O(n!)$	Факториальная

Для наглядности представления увеличения сложности от размера входных данных графики классов сложности приведены на рисунке 4.1.

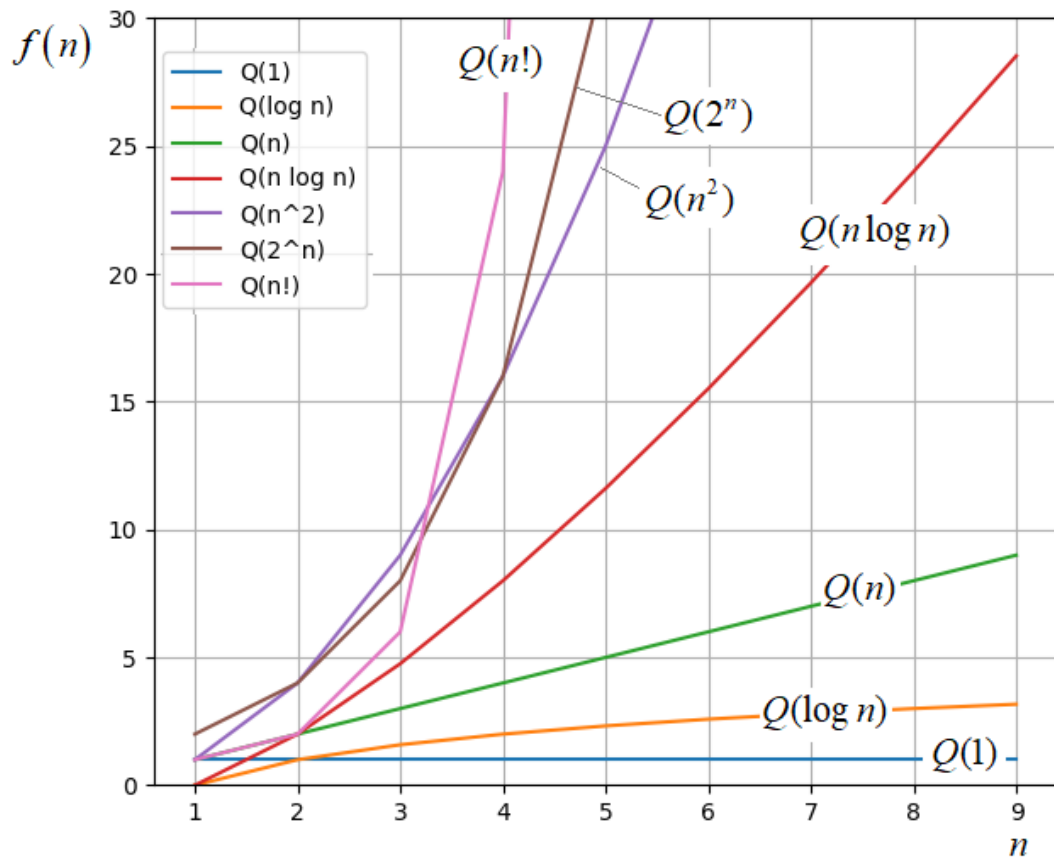


Рисунок 4.1 – Зависимость сложности алгоритмов от входных данных

Очевидно, что определить количество циклов модели до начала вычислений невозможно, ведь итоговое количество циклов моделирования и является искомой величиной t . За цикл модель выполняет несколько операций:

- изменение переменной номера цикла;
- случайный выбор дневной наработки;
- прибавление дневной наработки к текущей;
- расчёт вероятности отказа для нового значения текущей наработки;
- расчёт вероятности срабатывания отказа;
- сопоставление значений вероятностей и определение итога, при отказе – конец моделирования, при работоспособности – продолжение выполнения программы.

Всего за один цикл производится 6 числовых низко ранговых операций. Значит при расчёте сложности принимаем:

$$n = 6t$$

После наступления отказа выполняются вычисления логистических данных по возможности и срокам поставки. Всего количество вариантов поставки задаётся пользователем до начала моделирования, следовательно сложность этих операций постоянна и может не учитываться при определении сложности всего алгоритма.

Количество циклов прямо пропорционально количеству дней имитации сложности алгоритма $O(n)$ – что соответствует линейной сложности. Такие алгоритмы выполняются с постоянной скоростью на протяжении множества циклов и слабо подвержены перегрузке ввиду укрупнения входных значений.

Ввиду развития технологий алгоритмы такого уровня без проблем выполняются на любых современных вычислительных устройствах, не требуют использования профессиональных машин для хранения и вычисления данных. Учитывая характер вычисления времени в сутках реальные значения n вряд ли выходят за пределы нескольких тысяч циклов, что означает уверенность в непродолжительной работе модели даже в самых худших условиях.

Оценка сложности алгоритма показала низкую нагрузку на ЭВМ, что устраняет потребность в использовании сложных низкоуровневых ЯИМ. Алгоритм может быть воплощён в простых высокоуровневых ЯОН с возможностью использования абстракций и понятной формулировке кода с минимальными потерями в производительности.

Для разработки программного обеспечения моделирования наработки и прогнозирования отказов был выбран язык Python ввиду его простой имплементации на любых вычислительных машинах, возможности создания собственного специализированного приложения для выполнения поставленных задач, наличия библиотек визуализации и вывода результатов в отчётной форме. Python позволяет адаптировать высокоуровневую логику приложения, что позволяет расширять сложные системы по необходимости, является самым распространённым языком в области обработки информации.

В языке существует возможность использования комбинированных парадигм объектно-ориентированного и функционального программирования. Так,

например, возможно написание функций, например моделирования, работающих с объектами, такими как деталь системы, имеющая собственные данные о наработке, сроке службы, дневной производительности и т.д. Это значительно облегчает расширение кодовой базы и облегчает добавление новых параметров, основанных на общей модели и архитектуре объектов.

Само приложение должно являться графическим интерфейсом с возможностью ввода всех необходимых для функционирования модели данных, такими как дневная наработка, наработка на отказ, наименование деталей для отчётности, информации о поставщиках и сроках поставки.

4.2 Описание разработанного приложения для осуществления имитационного моделирования.

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 ПО представляет собой отдельный исполняемый файл. Интерфейс приложения приведён на рисунке 4.2.

Имитационная модель отказа изделий

Имя:

Наработка:

Ресурс:

Дн. наработка:

Добавить поставщика

Рассчитать до отказа

Рассчитать 1000 циклов

Построить график

Рисунок 4.2 – Интерфейс приложения для моделирования наработки и прогнозирования отказов

Интерфейс состоит из двух панелей и трёх кнопок производства расчёта. Левая панель отвечает за ввод информации о моделируемом изделии. Для формирования отчётной документации в программу вводится наименование изделия. Поле «Наработка» заполняется значением текущей наработки изделия, таким образом для нового компонента значение наработки равняется нулю. Поле «Ресурс» заполняется значением максимального ресурса, определённого статистически по данным о максимальной наработке на отказ данного изделия на предприятии или по данным, предоставленным заводом изготовителем. В поле «Дн. Нарработка» вводятся данные о производительности изделия за день минимальное и максимально значение за всю продолжительность эксплуатации данных узлов на предприятии. Полностью заполненная панель приведена на рисунке 4.3 для совершенно нового изделия.

Имитационная модель отказа изделий

Имя: Изделие №42

Наработка: 0

Ресурс: 100000

Дн. наработка: МИН 20 МАКС 50

Добавить поставщика

Рассчитать до отказа

Рассчитать 1000 циклов

Построить график

Рисунок 4.3 – Пример заполнения информации об изделии

Правая панель отвечает за информацию о поставщиках запасных частей. При выборе опции «Добавить поставщика» открывается вспомогательное окно, приведённое на рисунках 4.4 и 4.5. В этом окне для формирования отчётов данные о поставщике, о сроках поставки запасных частей для данного поставщика и дополнительные данные о качестве, надёжности и стоимости изделий и его доставки для последующего анализа нескольких вариантов поставки.

Имитационная модель отказа изделий

Имя: И

Наработка: 0

Ресурс: 10

Дн. наработка: 20

Имя поставщика:

Полная стоимость:

Срок поставки:

Надёжность поставщика:

Качество детали:

Добавить Отмена

Рисунок 4.4 – Окно ввода данных поставщика.

Имитационная модель отказа изделий

Имя: И

Наработка: 0

Ресурс: 10

Дн. наработка: 20

Имя поставщика: АО "Техника"

Полная стоимость: 1500000

Срок поставки: 50

Надёжность поставщика: 0.6

Качество детали: 0.7

Добавить Отмена

Рисунок 4.5 – Заполненное окно ввода данных поставщика.

При выборе опции «Добавить» название поставщика отобразится в правой таблице основного окна приложения (рис. 4.6). Возможно добавление множества поставщиков посредством многочисленного введения данных для каждого поставщика отдельно. Каждый новый поставщик отображается в правой панели (рис. 4.7)

Имитационная модель отказа изделий

Имя: Изделие №42

Наработка: 0

Ресурс: 100000

Дн. наработка: МИН 20 МАКС 50

Добавить поставщика

АО "Техника"

Рассчитать до отказа

Рассчитать 1000 циклов

Построить график

Рисунок 4.6 – Главное окно после ввода данных поставщика.

Атрибутивная информация для каждого поставщика сохраняется отдельно и будет выведена в результате расчёта в отчётной документации. Срок поставки в сутках, полная стоимость в рублях, данные о качестве и надёжности вводятся в собственном, согласованном между оценками, формате.

После ввода всех данных об изделии и поставщиках при нажатии опции «Рассчитать до отказа» откроется диалоговое окно выбора места сохранения файла результатов (рис. 4.8). После выбора папки для сохранения отчёта и выборе опции

«Запустить расчёт» на основании входных данных будет произведена одна имитация алгоритма до отказа изделия.

Имитационная модель отказа изделий

Имя: Изделие №42

Наработка: 0

Ресурс: 100000

Дн. наработка: МИН 20 МАКС 50

Добавить поставщика

АО "Техника"

ИП "Иванов И.И."

ООО "РемКомМаш"

Hensel AG

Рассчитать до отказа

Рассчитать 1000 циклов

Построить график

Рисунок 4.7 – Главное окно при введении множества поставщиков

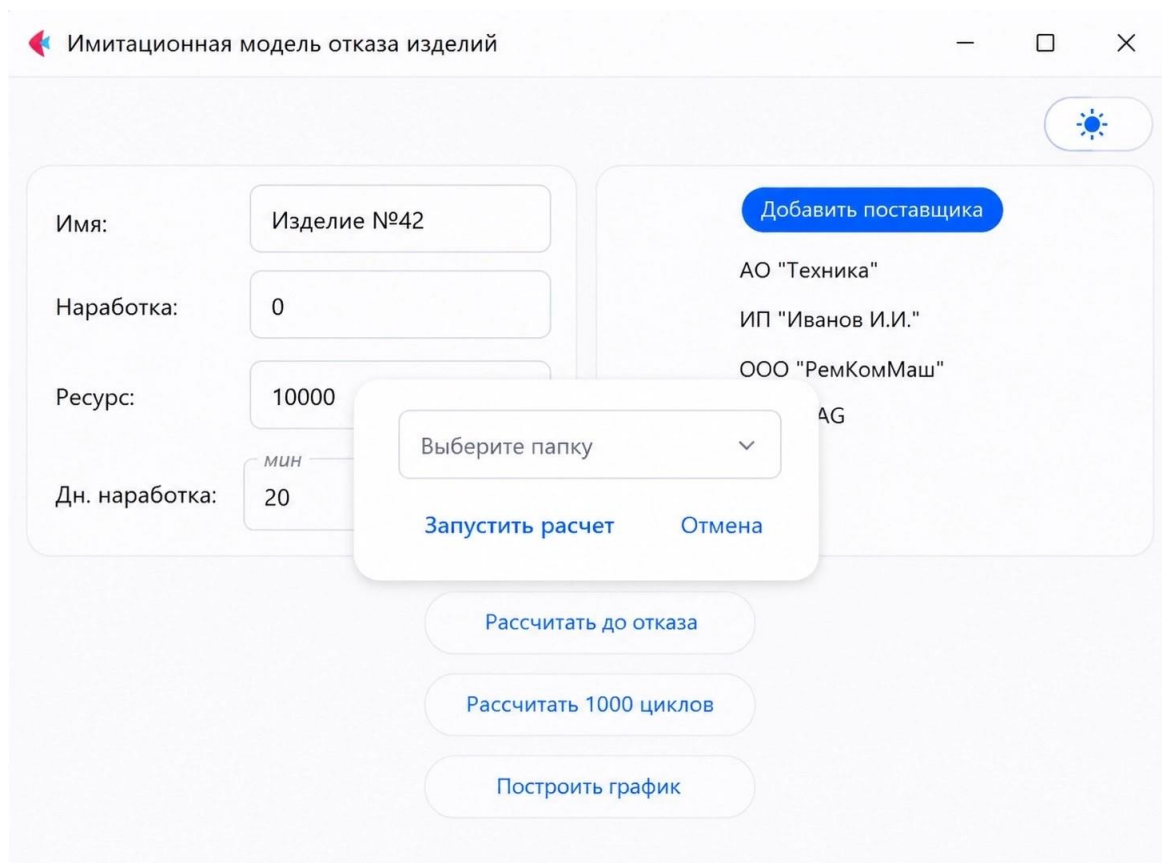


Рисунок 4.8 – Окно выбора места сохранения отчётной документации

По окончании расчёта пользователь будет уведомлен о завершении работы алгоритма (рис. 4.9).

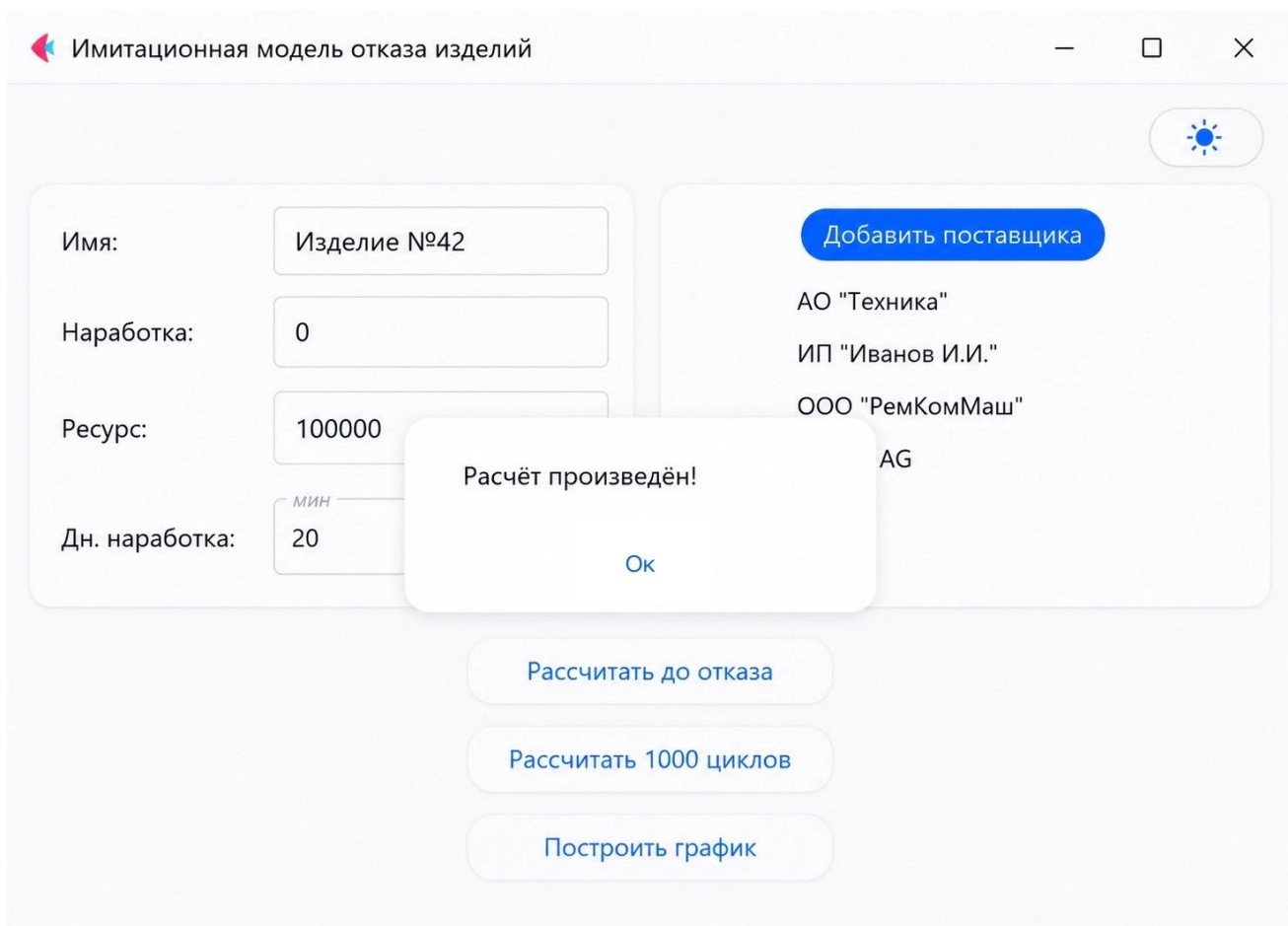


Рисунок 4.9 – Сообщение об успешном выполнении расчётов

В текущем исполнении ПО результаты сохраняются в текстовый файл «result.txt» в выбранной папке. Пример файла результата расчёта приведён на рисунке 4.10. 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 (в введённых единицах измерения).

То есть на первый день имитации деталь была задействована в 51,7798 единицах работы, что незначительно выше максимальной заданной наработке, 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 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 начале моделирования и прогнозируемой дате отказа. Важным параметром так же 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 деталь приехала к моменту отказа, рассчитанному в итерациях моделирования. Последние строки файла результатов приведены на рисунке 4.11.

Из данного примера наблюдается сомнительность результатов при единичном цикле моделирования. Действительно, ввиду имитации вероятностных переменны могут быть получены результаты, далёкие от средне ожидаемых, однако посредством использования множества циклов имитации. Для этого воспользуемся опцией «Рассчитать 1000 циклов» на главном окне приложения.

При выборе данной опции 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 итерации внутри цикла. Пример: первый цикл был закончен на 385 дне, детали отработала 13159,4637 единиц выработки, тогда как второй уже на 1045 дне с наработкой в 36714,5039. Максимальным оказался цикл №671 в 2032 дня с выработкой в 71304,5190 едини, а минимальный цикл №199 длиной в 1 день и выработкой 27,4202. Такие значения далеко отклонены от средних и компенсируют друг друга.

Последними строками файла результатов расчёта 1000 циклов (рис. 4.13) так же идёт отладочная информация, данные о средних значениях продолжительности

работы детали и дата среднего отказа изделия на основе 1000 циклов имитации наработки до отказа. С укрупнением количества циклов средние значения будут все более и более приближены к средне ожидаемым и идентичным по разным сессиям моделирования.

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 даты заказа запасных частей по разным предприятиям на основе среднего значения продолжительности безотказной работы и учёте срока поставки.

После выполнения расчёта на 1000 циклов возможно построение диаграммы частоты отказов. График отобразится в новой панели на главном окне приложения. Пример построенного графика на рисунке 4.14.

Однако использование программы для моделирования новых деталей не является эффективным способом применения, так как при увеличении продолжительности работы изделий увеличивается и степень влияния неопределённости и вероятностных переменных. Приведём пример работы ПО на других данных, представим, что после ТО выбранный агрегат выработал 500 условных единиц работы из максимального на предприятии в 4000. Дневная производительность изделия колебалась между 3 и 8 у.е. Для данной детали есть два поставщика запасных частей. При внесении данных в программу получаем рисунок 4.15. Средний срок отказа 234 дня, график частоты отказов более напоминает полученные в главе 3 зависимости, продолжительность имитации заметно снизилась, а полученные данные соответствуют значениям, получаемым при простом предположении [183-191].

Подробнее результаты работы программного обеспечения приведены в приложениях А и Б.



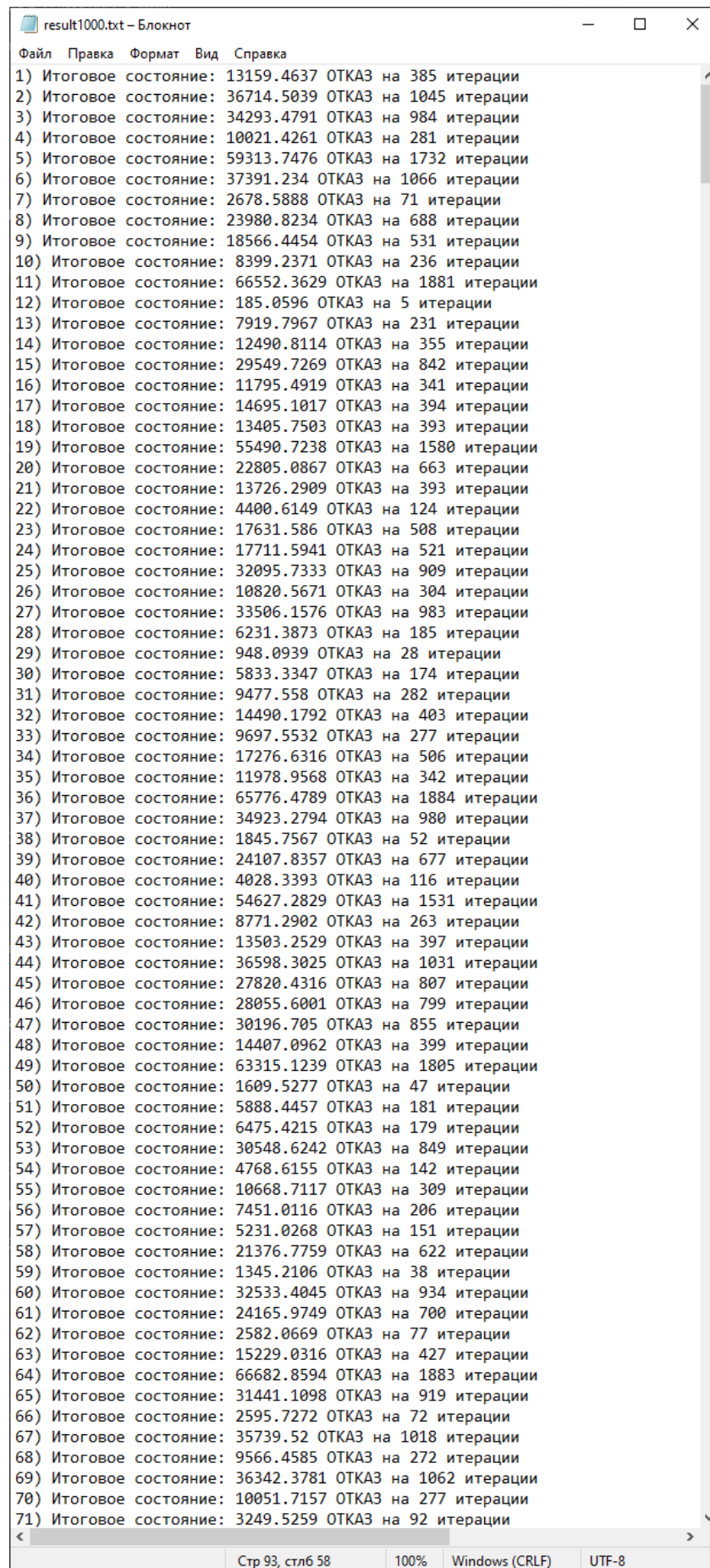
Рисунок 4.10 – Файл результатов расчёта до отказа

```
result.txt – Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
282) Текущее состояние: 9508.3065
283) Текущее состояние: 9560.7229
284) Текущее состояние: 9582.0394
285) Текущее состояние: 9621.7161
286) Текущее состояние: 9634.7421
287) Текущее состояние: 9683.0499
288) Текущее состояние: 9755.8266
289) Текущее состояние: 9794.115
290) Текущее состояние: 9816.3786
291) Текущее состояние: 9838.6517
292) Текущее состояние: 9892.6414
293) Текущее состояние: 9945.119
294) Текущее состояние: 9984.201
295) Текущее состояние: 10032.7825
296) Текущее состояние: 10053.7862
297) Текущее состояние: 10094.765
298) Текущее состояние: 10155.5812
299) Текущее состояние: 10167.0421
300) Текущее состояние: 10207.9116
301) Текущее состояние: 10237.5763
302) Текущее состояние: 10277.4734
303) Текущее состояние: 10308.8336
304) Текущее состояние: 10355.7223
305) Текущее состояние: 10393.7799
306) Текущее состояние: 10407.9395
307) Текущее состояние: 10460.3711
308) Текущее состояние: 10505.6763
309) Текущее состояние: 10541.9362
310) Текущее состояние: 10588.658
311) Текущее состояние: 10632.0895
312) Текущее состояние: 10674.8368
313) Текущее состояние: 10718.619
314) Текущее состояние: 10751.3096
315) Текущее состояние: 10781.6082
316) Текущее состояние: 10817.6181
317) Текущее состояние: 10863.2259
318) Текущее состояние: 10899.0521
319) Текущее состояние: 10951.024
320) Текущее состояние: 10961.8753
321) Текущее состояние: 10985.0043
322) Текущее состояние: 11028.1449
323) Текущее состояние: 11051.7198
324) Текущее состояние: 11072.0465
325) Текущее состояние: 11114.7088
326) Текущее состояние: 11153.9084
327) Текущее состояние: 11226.4948
328) Текущее состояние: 11258.8087
329) Текущее состояние: 11305.8295
330) Текущее состояние: 11358.7445
331) Текущее состояние: 11380.8339
332) Текущее состояние: 11415.0552
333) Текущее состояние: 11454.4586
334) Текущее состояние: 11476.5181
335) Текущее состояние: 11513.6834
336) Текущее состояние: 11569.3911
337) Текущее состояние: 11605.8325
338) Текущее состояние: 11642.3763
339) Текущее состояние: 11676.3832
340) Текущее состояние: 11717.1004 ОТКАЗ при максимальном ресурсе 100000

Начало 26.04.2025
Отказ 01.04.2026
При вероятности отказа: 0.0001
-----

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ПОСТАВЩИКИ
АО "Техника": Дата заказа - 10.02.2026, Стоимость - 1500000, Надежность по
ИП "Иванов И.И.": Дата заказа - 17.03.2026, Стоимость - 1200000, Надежность
ООО "РемКомМаш": Дата заказа - 10.02.2026, Стоимость - 1700000, Надежность
Hensei AG: Дата заказа - 02.12.2025, Стоимость - 2300000, Надежность поста
```

Рисунок 4.11 – Последние строки файла результатов расчёта до отказа



```
result1000.txt - Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
1) Итоговое состояние: 13159.4637 ОТКАЗ на 385 итерации
2) Итоговое состояние: 36714.5039 ОТКАЗ на 1045 итерации
3) Итоговое состояние: 34293.4791 ОТКАЗ на 984 итерации
4) Итоговое состояние: 10021.4261 ОТКАЗ на 281 итерации
5) Итоговое состояние: 59313.7476 ОТКАЗ на 1732 итерации
6) Итоговое состояние: 37391.234 ОТКАЗ на 1066 итерации
7) Итоговое состояние: 2678.5888 ОТКАЗ на 71 итерации
8) Итоговое состояние: 23980.8234 ОТКАЗ на 688 итерации
9) Итоговое состояние: 18566.4454 ОТКАЗ на 531 итерации
10) Итоговое состояние: 8399.2371 ОТКАЗ на 236 итерации
11) Итоговое состояние: 66552.3629 ОТКАЗ на 1881 итерации
12) Итоговое состояние: 185.0596 ОТКАЗ на 5 итерации
13) Итоговое состояние: 7919.7967 ОТКАЗ на 231 итерации
14) Итоговое состояние: 12490.8114 ОТКАЗ на 355 итерации
15) Итоговое состояние: 29549.7269 ОТКАЗ на 842 итерации
16) Итоговое состояние: 11795.4919 ОТКАЗ на 341 итерации
17) Итоговое состояние: 14695.1017 ОТКАЗ на 394 итерации
18) Итоговое состояние: 13405.7503 ОТКАЗ на 393 итерации
19) Итоговое состояние: 55490.7238 ОТКАЗ на 1580 итерации
20) Итоговое состояние: 22805.0867 ОТКАЗ на 663 итерации
21) Итоговое состояние: 13726.2909 ОТКАЗ на 393 итерации
22) Итоговое состояние: 4400.6149 ОТКАЗ на 124 итерации
23) Итоговое состояние: 17631.586 ОТКАЗ на 508 итерации
24) Итоговое состояние: 17711.5941 ОТКАЗ на 521 итерации
25) Итоговое состояние: 32095.7333 ОТКАЗ на 909 итерации
26) Итоговое состояние: 10820.5671 ОТКАЗ на 304 итерации
27) Итоговое состояние: 33506.1576 ОТКАЗ на 983 итерации
28) Итоговое состояние: 6231.3873 ОТКАЗ на 185 итерации
29) Итоговое состояние: 948.0939 ОТКАЗ на 28 итерации
30) Итоговое состояние: 5833.3347 ОТКАЗ на 174 итерации
31) Итоговое состояние: 9477.558 ОТКАЗ на 282 итерации
32) Итоговое состояние: 14490.1792 ОТКАЗ на 403 итерации
33) Итоговое состояние: 9697.5532 ОТКАЗ на 277 итерации
34) Итоговое состояние: 17276.6316 ОТКАЗ на 506 итерации
35) Итоговое состояние: 11978.9568 ОТКАЗ на 342 итерации
36) Итоговое состояние: 65776.4789 ОТКАЗ на 1884 итерации
37) Итоговое состояние: 34923.2794 ОТКАЗ на 980 итерации
38) Итоговое состояние: 1845.7567 ОТКАЗ на 52 итерации
39) Итоговое состояние: 24107.8357 ОТКАЗ на 677 итерации
40) Итоговое состояние: 4028.3393 ОТКАЗ на 116 итерации
41) Итоговое состояние: 54627.2829 ОТКАЗ на 1531 итерации
42) Итоговое состояние: 8771.2902 ОТКАЗ на 263 итерации
43) Итоговое состояние: 13503.2529 ОТКАЗ на 397 итерации
44) Итоговое состояние: 36598.3025 ОТКАЗ на 1031 итерации
45) Итоговое состояние: 27820.4316 ОТКАЗ на 807 итерации
46) Итоговое состояние: 28055.6001 ОТКАЗ на 799 итерации
47) Итоговое состояние: 30196.705 ОТКАЗ на 855 итерации
48) Итоговое состояние: 14407.0962 ОТКАЗ на 399 итерации
49) Итоговое состояние: 63315.1239 ОТКАЗ на 1805 итерации
50) Итоговое состояние: 1609.5277 ОТКАЗ на 47 итерации
51) Итоговое состояние: 5888.4457 ОТКАЗ на 181 итерации
52) Итоговое состояние: 6475.4215 ОТКАЗ на 179 итерации
53) Итоговое состояние: 30548.6242 ОТКАЗ на 849 итерации
54) Итоговое состояние: 4768.6155 ОТКАЗ на 142 итерации
55) Итоговое состояние: 10668.7117 ОТКАЗ на 309 итерации
56) Итоговое состояние: 7451.0116 ОТКАЗ на 206 итерации
57) Итоговое состояние: 5231.0268 ОТКАЗ на 151 итерации
58) Итоговое состояние: 21376.7759 ОТКАЗ на 622 итерации
59) Итоговое состояние: 1345.2106 ОТКАЗ на 38 итерации
60) Итоговое состояние: 32533.4045 ОТКАЗ на 934 итерации
61) Итоговое состояние: 24165.9749 ОТКАЗ на 700 итерации
62) Итоговое состояние: 2582.0669 ОТКАЗ на 77 итерации
63) Итоговое состояние: 15229.0316 ОТКАЗ на 427 итерации
64) Итоговое состояние: 66682.8594 ОТКАЗ на 1883 итерации
65) Итоговое состояние: 31441.1098 ОТКАЗ на 919 итерации
66) Итоговое состояние: 2595.7272 ОТКАЗ на 72 итерации
67) Итоговое состояние: 35739.52 ОТКАЗ на 1018 итерации
68) Итоговое состояние: 9566.4585 ОТКАЗ на 272 итерации
69) Итоговое состояние: 36342.3781 ОТКАЗ на 1062 итерации
70) Итоговое состояние: 10051.7157 ОТКАЗ на 277 итерации
71) Итоговое состояние: 3249.5259 ОТКАЗ на 92 итерации
Стр 93, столб 58    100%    Windows (CRLF)    UTF-8
```

Рисунок 4.12 – Файл результатов расчёта 1000 циклов


```
result1000.txt – Блокнот
Файл Правка Формат Вид Справка
946) Итоговое состояние: 19204.922 ОТКАЗ на 555 итерации
947) Итоговое состояние: 37083.3839 ОТКАЗ на 1078 итерации
948) Итоговое состояние: 6819.6055 ОТКАЗ на 195 итерации
949) Итоговое состояние: 39519.1851 ОТКАЗ на 1161 итерации
950) Итоговое состояние: 4375.2476 ОТКАЗ на 124 итерации
951) Итоговое состояние: 24908.811 ОТКАЗ на 699 итерации
952) Итоговое состояние: 50424.4931 ОТКАЗ на 1441 итерации
953) Итоговое состояние: 12562.698 ОТКАЗ на 353 итерации
954) Итоговое состояние: 10036.8436 ОТКАЗ на 285 итерации
955) Итоговое состояние: 40255.5467 ОТКАЗ на 1125 итерации
956) Итоговое состояние: 36706.1461 ОТКАЗ на 1040 итерации
957) Итоговое состояние: 2617.1419 ОТКАЗ на 72 итерации
958) Итоговое состояние: 3206.3989 ОТКАЗ на 93 итерации
959) Итоговое состояние: 3284.8491 ОТКАЗ на 84 итерации
960) Итоговое состояние: 38634.928 ОТКАЗ на 1106 итерации
961) Итоговое состояние: 49147.4835 ОТКАЗ на 1407 итерации
962) Итоговое состояние: 3961.2988 ОТКАЗ на 116 итерации
963) Итоговое состояние: 42467.2002 ОТКАЗ на 1199 итерации
964) Итоговое состояние: 6996.0162 ОТКАЗ на 201 итерации
965) Итоговое состояние: 49334.3095 ОТКАЗ на 1386 итерации
966) Итоговое состояние: 33283.4533 ОТКАЗ на 958 итерации
967) Итоговое состояние: 36360.0078 ОТКАЗ на 1077 итерации
968) Итоговое состояние: 7985.3768 ОТКАЗ на 223 итерации
969) Итоговое состояние: 57669.543 ОТКАЗ на 1654 итерации
970) Итоговое состояние: 8096.6683 ОТКАЗ на 228 итерации
971) Итоговое состояние: 2920.9665 ОТКАЗ на 78 итерации
972) Итоговое состояние: 26521.469 ОТКАЗ на 768 итерации
973) Итоговое состояние: 40542.3649 ОТКАЗ на 1149 итерации
974) Итоговое состояние: 70279.5891 ОТКАЗ на 2006 итерации
975) Итоговое состояние: 641.0387 ОТКАЗ на 20 итерации
976) Итоговое состояние: 32757.1709 ОТКАЗ на 934 итерации
977) Итоговое состояние: 9795.7029 ОТКАЗ на 281 итерации
978) Итоговое состояние: 6771.8295 ОТКАЗ на 193 итерации
979) Итоговое состояние: 27953.2573 ОТКАЗ на 806 итерации
980) Итоговое состояние: 14181.5385 ОТКАЗ на 389 итерации
981) Итоговое состояние: 30270.2146 ОТКАЗ на 872 итерации
982) Итоговое состояние: 15848.5359 ОТКАЗ на 441 итерации
983) Итоговое состояние: 29137.4141 ОТКАЗ на 826 итерации
984) Итоговое состояние: 43947.7343 ОТКАЗ на 1262 итерации
985) Итоговое состояние: 1643.732 ОТКАЗ на 51 итерации
986) Итоговое состояние: 456.7058 ОТКАЗ на 15 итерации
987) Итоговое состояние: 34285.3534 ОТКАЗ на 987 итерации
988) Итоговое состояние: 32941.1227 ОТКАЗ на 937 итерации
989) Итоговое состояние: 1781.5357 ОТКАЗ на 48 итерации
990) Итоговое состояние: 8586.2024 ОТКАЗ на 253 итерации
991) Итоговое состояние: 42899.0599 ОТКАЗ на 1210 итерации
992) Итоговое состояние: 3974.1343 ОТКАЗ на 114 итерации
993) Итоговое состояние: 62910.206 ОТКАЗ на 1827 итерации
994) Итоговое состояние: 62023.1505 ОТКАЗ на 1791 итерации
995) Итоговое состояние: 28441.3066 ОТКАЗ на 818 итерации
996) Итоговое состояние: 3468.3321 ОТКАЗ на 108 итерации
997) Итоговое состояние: 16804.8574 ОТКАЗ на 489 итерации
998) Итоговое состояние: 22396.0997 ОТКАЗ на 646 итерации
999) Итоговое состояние: 28507.7582 ОТКАЗ на 816 итерации
1000) Итоговое состояние: 54153.3108 ОТКАЗ на 1545 итерации

-----

Минимальный срок отказа: 1
Максимальный срок отказа: 2032
Средний срок отказа: 702.686
Средняя дата отказа: 29.03.2027

-----

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ПОСТАВЩИКИ
АО "Техника": Дата заказа - 07.02.2027, Стоимость - 1500000, Надежность по
ИП "Иванов И.И.": Дата заказа - 14.03.2027, Стоимость - 1200000, Надежности
ООО "РемКомМаш": Дата заказа - 07.02.2027, Стоимость - 1700000, Надежность
Hensel AG: Дата заказа - 29.11.2026, Стоимость - 2300000, Надежность поста
```

Рисунок 4.13 – Последние строки файла результатов расчёта 1000 циклов

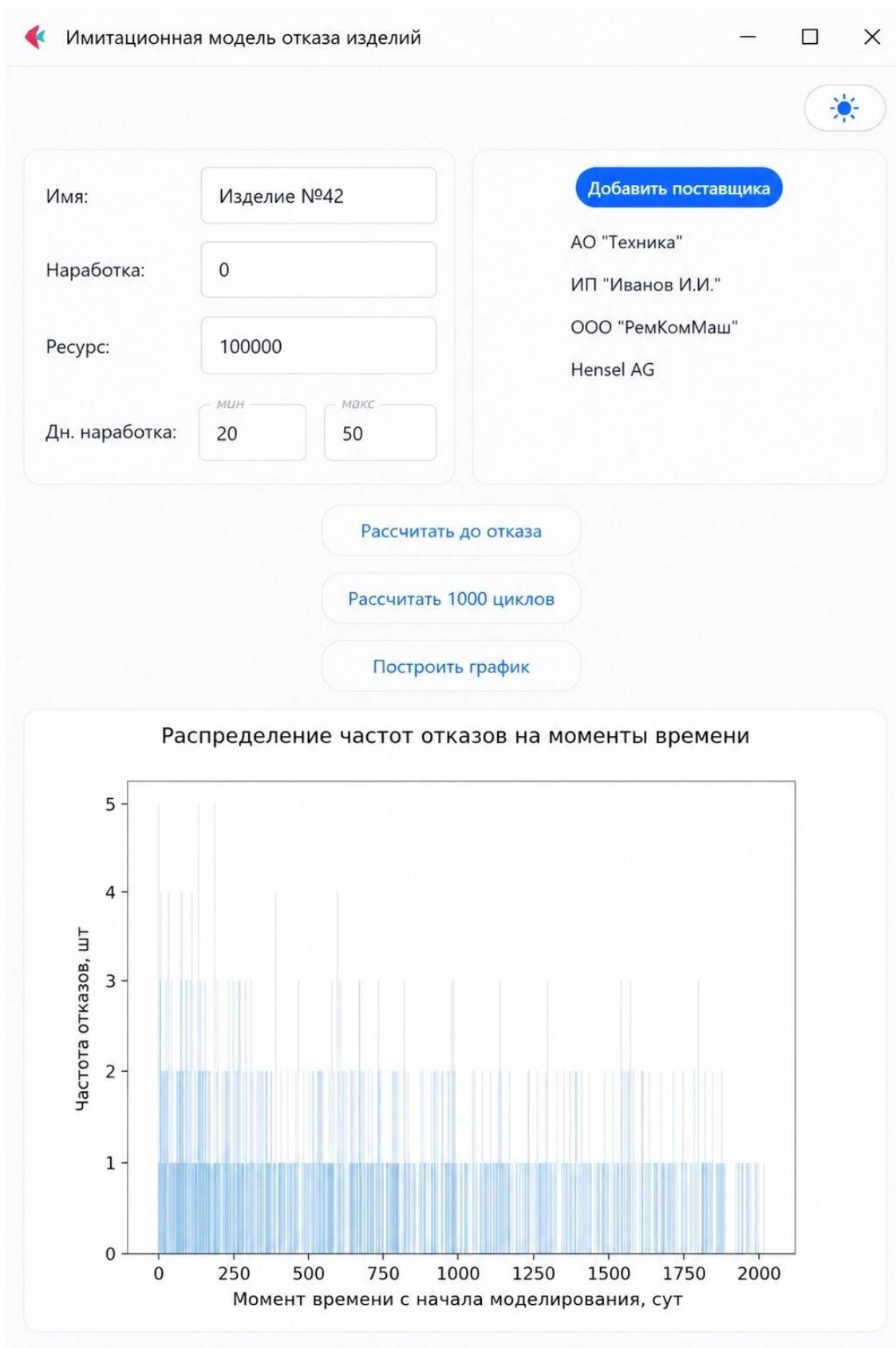


Рисунок 4.14 – Построенные график частоты отказов.



Рисунок 4.15 – Интерфейс примера возникновения отказов агрегата техники

4.3 Практическая польза метода при выборе поставщиков.

Кроме минимизации убытков при содержании запаса деталей и устранении времени простоя специальной автомобильной техники моделирования несёт очень важный характер для процесса принятия решения о выборе поставщиков запасных частей. Так как производителей деталей может быть множество, их расположение относительно предприятия может варьироваться от местных заводов изготовителей до импортёров из стран Европы и Азии срок поставки имел большое значение в процессе выбора оптимального контрагента.

Данные, полученные из окончания файла расчёта 1000 циклов могут быть использованы при процедуре принятия решения о выборе поставщика. При гипотезе верности проведённой имитации срок поставки детали перестаёт иметь вес при анализе различных вариантов поставки. Если деталь прибудет на предприятии вовремя вне зависимости от сроков ожидания поставки, данный фактор можно полностью исключить из задачи принятия решения.

Комплексный характер оценки поставки обуславливает необходимость одновременного учёта нескольких характеристик, определяющих эффективность выбранного варианта снабжения [198]. Как известно, задача принятия решения в условиях неопределённости зависит от множества факторов, а главное от приоритетов лица принимающего решение (ЛПР). Так как определить оптимальное отношение важности различных факторов не предстаёт возможным при выборе необходимо руководствоваться множеством их возможных проявлений.

По существу, задачи с неопределённость описываются функцией:

$$y = F(x, z) \quad (4.1)$$

$$x \in X, z \in Z, y \in Y \quad (4.2)$$

Так z принадлежит вектору Z , который описывает степень неопределённости. Ситуацию выбора в условиях неопределённости представляют в виде матрицы решений (табл. 4.1).

Из общей теории исследования операций известно, что решения обладают устойчивостью по отношению к изменениям исходной информации.

Это означает, что не обязательно точно знать все входные параметры решаемой задачи. Другими словами, неверно исходить из полного незнания обстановки, и нет необходимости стремиться к полному снятию неопределённости. Требуется целеустремлённое уточнение лишь действительно необходимой информации, для определения которой могут быть с успехом использованы методы районирования.

Таблица 4.1 – Матрица решений типовой задачи в условиях неопределённости.

X	Z
	$Z_1 \dots Z_j \dots Z_m$
X_1	$Y_{11} \dots Y_{1j} \dots Y_{1m}$
...	
X_j	$Y_{j1} \dots Y_{jj} \dots Y_{jm}$
...	
X_n	$Y_{n1} \dots Y_{nj} \dots Y_{nm}$

Подход районирования состоит в исследовании всего поля распределения вероятностей путём нахождения экстремальных значений эффективности некоторых решений с целью решения обратной задачи принятия решения. Если классическая задача говорит: «Какое решение оптимально при заданных состояниях среды?» обратная задача трактуется как «При каком состоянии среды данное решение теряет оптимальность?». Такая интерпретация задачи не лишает ЛПР входных данных, ведь в условиях неопределённости изначально не задано ни точное состояние среды, ни его вероятностные распределения [192-195].

Такой обратный подход к задаче позволяет определить критические значения внешних факторов, при которых принимаемое нами решение теряло свою оптимальность и уступало другому.

Разберём две задачи выбора поставщиков.

Задача 1. Без использования моделирования сроков отказа.

Задача 2. С моделированием срока отказа и ликвидации одного фактора в задаче.

Пусть существует 5 поставщиков запасных частей для условной техники. Матрица значений факторов приведена в таблице 4.2. Значения заранее нормализованы.

Таблица 4.2 – Данные задачи принятия решения

Поставщики	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5	Фактор 6	Фактор срока поставки
1	0,067	0,188	0,167	0,333	0,278	0,111	0,222
2	0,200	0,250	0,167	0,267	0,222	0,333	0,278
3	0,333	0,188	0,417	0,133	0,222	0,222	0,111
4	0,067	0,250	0,167	0,067	0,111	0,222	0,222
5	0,333	0,125	0,083	0,200	0,167	0,111	0,167

При решении задачи получаем количество областей доминирования определённых альтернатив для данной задачи с учётом фактора срока поставки:

$$D_1 = 61, D_2 = 3237, D_3 = 1742, D_4 = 0, D_5 = 0$$

Исходя из данных условий в большинстве ситуаций поставщик номер 2 будет наиболее оптимален, следующий за ним поставщик номер 3, который отстывает чуть менее чем в два раза и в минимальном количестве областей доминирует первый поставщик.

Решим вторую задачу, исключив влияние фактора времени. Полученные области доминирования альтернатив:

$$D_1 = 17, D_2 = 335, D_3 = 368, D_4 = 0, D_5 = 0$$

Теперь поставщик 3 является наиболее оптимальным выбором, следующий за ним поставщик 2 приближается к нему, а поставщик 1 всё так же является оптимальным в малом наборе состояний среды.

При исключении фактора из задачи сложность вычислений уменьшается факториально, то есть при 7 факторах всего существует 5040 решений, а при 6 в семь

раз меньше, то есть 720. При небольшом количестве учитываемых переменных этот эффект незаметен, однако при вычислении крупных многофакторных задач с количеством критериев от 15 до 20 сложность вычислений и нагрузки снижается ещё больше.

Итоговое оптимальное решение так же было изменено после исключения фактора срока поставки. Так, например при выборе между деталями с идентичной стоимостью, разным качеством и сроком поставки (например, возможно приобрести низкокачественное изделие на местном производстве или по аналогичной итоговой цене у фабрики за границей, но высокого качества) принятие решения может быть основано на сроке ожидания детали, ведь велик риск простоя специальной автомобильной техники в ожидании запасных частей. Теперь же можно однозначно отдать предпочтение более качественной альтернативе.

Выводы по четвёртой главе

1. Произведена оценка сложности разработанного алгоритма в отношении нагрузки на вычислительные мощности оборудования. Его сложность оказалась на низком уровне, выполнение расчётов оказалось возможным на любой современной рабочей машине без необходимости инвестирования в дорогостоящие профессиональные вычислительные станции. Доказано, что ПО может быть внедрено в любой сфере в любом предприятии.

2. Выбран способ имплементации модели в виде программы «калькулятора», способной быть установленным на любую операционную систему, обширно используемому на практике анализа данных на языке программирования Python. Выбор был обоснован возможностью простого расширения возможностей алгоритма, лёгкой нагрузкой на систему и обширном использовании в области анализа данных.

3. 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 графическом представлении в виде графика частот отказов на определённые сроки эксплуатации.

4. Описано дополнительное применение метода при выборе поставщиков запасных частей. Доказано изменение оптимальных результатов принятия решений при использовании моделирования с целью исключения критерия срока поставки из задачи принятия решения.

5 ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗА УЗЛОВ СПЕЦИАЛЬНОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ АЭРОПОРТОВ

5.1 Расчёт экономической эффективности применения метода моделирования отказов

Практика информационного моделирования технологических процессов вводится повсеместно [169]. Бизнес-процесс представляет собой ряд последовательных действий, выполняемых сотрудниками или подразделениями компании для достижения целей организации: реализация отдельных видов работ, предоставление услуг, внутренние процессы в компании, коммуникация с клиентами и другие виды внешних коммуникаций и т.п. Бизнес-процессы — любые операции внутри компании, которые помогают решать бизнес-задачи и зарабатывать. Моделирование бизнес-процессов — описание этих операций и документирование требований к ним.

Моделирование помогает руководству и менеджменту компании отслеживать текущую ситуацию на производстве или в других подразделениях бизнеса, корректировать происходящие процессы и модернизировать их, обеспечивая оптимальное сочетание расходуемых ресурсов и получаемой прибыли (полезных результатов).

Любые процессы, требующие принятия решения руководством предприятия, могут и должны быть спланированы. Предварительный анализ возможностей решения индивидуальных ситуаций позволяет составлять варианты действий при различном влиянии внешних факторов и степеней проявления событий. Отдельной сложностью считаются события с фактором неопределённости. Предсказать такие события зачастую невозможно без применения комплексных систем и алгоритмов, позволяющих прогнозировать их появление с определённой вероятностью, основанной на известных зависимостях в процессах.

В стремлении к большему контролю бизнес-процессов и необходимости планирования расходов предприятия обращаются к моделированию, от

моделирования последствий стратегических решений, до моделирования маленьких элементов систем.

Комплексная система обеспечения запасными частями специальной техники в аэропортах с целью планирования закупок элементов систем невозможна без прогнозирования моментов отказа таких узлов. Сама по себе вероятностная природа отказов подразумевает существенную долю неопределённости в процессах их возникновения. Задачи прогнозирования таких событий не могут быть решены методами линейного программирования.

Моделирование способствует оптимизации использования ресурсов, снижению затрат и повышению производительности посредством отслеживания влияния изменения входных данных на итоговый результат моделирования с учётом неопределённости в самом моделируемом процессе.

Моделирование вероятностных процессов позволяет провести множество экспериментов с одинаковыми исходными данными с получением разных результатов ввиду неопределённости самого моделируемого процесса, что позволяет учитывать комплексные факторы и разрабатывать несколько стратегий решения конкретной ситуации.

Информация, полученная в ходе моделирования наработки узлов специальной автомобильной техники, позволяет выбирать промежуточные решения в системе обеспечения запасными частями, которые, зачастую, располагаются на локальном минимуме функции затрат. Рассмотрим пример экономических затрат приведённых ранее стратегий логистического снабжения предприятия и стратегии моделирования.

Компьютерное моделирование является одним из эффективных методов изучения сложных систем. Компьютерные модели проще и удобнее применять и исследовать в силу их возможности проводить вычислительные эксперименты. Вычислительный эксперимент – это эксперимент, осуществляемый с помощью компьютерной модели, с целью прогноза состояний системы, ее реакций на входные сигналы.

Компьютерные модели позволяют выявлять основные факторы, определяющие свойства изучаемого объекта оригинала, в частности, исследовать отклик моделируемой технической системы на изменения ее параметров и начальных условий. Компьютерное моделирование заключается в проведении серии вычислительных экспериментов на компьютере, целью которых является анализ, интерпретация и сопоставление результатов моделирования с реальным поведением изучаемого объекта.

Понятие «бизнес-процесс» прочно вошло в арсенал современного менеджмента. Бизнес-процессы являются ключевым элементом большинства бизнес-моделей. Взгляд на предприятие как на совокупность бизнес-процессов оказывает, по мнению М. Джорджа, огромное влияние на его работу и является основой его интеграции [16]. К системному подходу, который как бы выводит мышление человека за границы привычных функциональных представлений, добавляется процессный подход, связывающий действия и помыслы сотрудников в единый поток создания ценности для клиентов. Процессный подход в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001–2015 включает в себя систематическое определение и менеджмент процессов, и их взаимодействие таким образом, чтобы достигать намеченных результатов в соответствии с политикой в области качества и стратегическим направлением организации. По мнению Б. Андерсена, центральной для понимания процессного подхода является модель «Поставщик – Процесс – Потребитель» [17].

Экономические системы обладают сложной внутренней структурой и сложным характером взаимодействия составляющих их бизнес-процессов. Очень часто невозможно обычными средствами дать простое описание и, следовательно, обеспечить понимание таких систем, что делает их проектирование, эксплуатацию и совершенствование делом трудоемким и дорогостоящим. Выполнить их непосредственно на реальной системе очень сложно, а иногда и просто невозможно. Значительно проще и дешевле создать модель системы и проводить на ней необходимые расчеты и эксперименты.

Под моделью принято понимать систему, способную замещать оригинал так, что ее изучение дает новую информацию об оригинале. Модель должна частично или полностью воспроизводить структуру моделируемой системы, ее функции. Но, как правило, она является упрощенным представлением сущностей, идей или действий. Модель, таким образом, представляет собой искусственный объект, отображение (образ) системы и ее элементов [196-202].

Совершенствование вычислительной техники и широкое распространение персональных компьютеров открыло перед моделированием огромные перспективы для исследования процессов и явлений окружающего мира. Компьютерное моделирование – это в определенной степени то же самое описанное выше моделирование, но реализуемое с помощью компьютерной техники. Для компьютерного моделирования важно наличие определенного программного обеспечения. При этом программное обеспечение, средствами которого может осуществляться компьютерное моделирование, может быть достаточно универсальным, так и весьма специализированным, предназначенным лишь для определенного вида моделирования. При этом следует четко понимать, что компьютер является хорошим инструментом для создания и использования моделей, но он их не придумывает. Абстрактный анализ окружающего мира с целью воссоздания его в модели выполняет человек.

Внедрение моделирования технологического процесса наработки узлов и агрегатов специальной автомобильной техники с целью определения момента отказа и потребности в ремонте может принести значительный экономический эффект, охватывающий различные аспекты деятельности предприятия. Данный процесс, как правило, распределяют по следующим категориям: уменьшение затрат на ремонт техники, оптимизация

Этот эффект можно разделить на несколько ключевых категорий: оптимизация расходов на ТОиР, оптимизация эксплуатации техники, минимизация рисков и совершенствование безопасности, экономическая оптимизация.

Качественно проведенное моделирование, учитывающее наработку на отказ конкретного узла техники, позволяет сократить расходы на запасные части и

временной простой техники, а также учитывать полученные результаты моделирования при планировании графиков ремонта и заказа запасных частей вместо регламентного ремонта.

Определенные запасные части специальной автомобильной техники аэропортов имеют ограниченное количество производителей, которые из-за ограничений (санкций) не осуществляют поставку запасных частей отечественным эксплуатантам техники. Данная проблема решается путем параллельного импорта, который в свою очередь увеличивает сроки доставки. В этой связи актуальность моделирования отказов узлов и агрегатов позволит более точно спрогнозировать как выход из строя техники, так и необходимый срок для заказа и доставки эксплуатанту.

Внеплановый выход из строя техники приводит к дополнительным финансовым затратам (эвакуация, оперативный ремонт, аренда аналогичной техники и др.) в этой связи корректное прогнозирование обеспечит минимизацию неожиданного выхода из строя техники, упредит дорогостоящий ремонт при капитальном ремонте, а также риски чрезвычайных ситуаций, связанных с обеспечением безопасности полётов [204].

На практике эксплуатанты специальной автомобильной техники аэропортов имеют в своём парке дополнительные единицы техники в целях её взаимозаменяемости на случай внештатной ситуации и выхода из строя. В целях оптимизации парка специальной автомобильной техники аэропортов, а также сокращения времени на её обслуживание благодаря моделированию возможно определить узлы и детали, наиболее подверженные поломке, и сконцентрировать деятельность профильных подразделений на их диагностику и ремонт. Все вышеперечисленные действия, связанные с моделированием, позволяют повысить качество и своевременность технического обслуживания и ремонта специальной автомобильной техники аэропортов, увеличить срок её службы, а также повысить её производительность. В конечном счёте эксплуатант сможет обеспечить снижение количества однотипных единиц техники без снижения экономических показателей своей деятельности.

Прогнозирование потребности в ремонте открывает возможность эффективного планирования маршрутов движения техники и графиков выполнения работ, избегая ситуаций, когда техника оказывается неисправной в критический момент. Регулярное и своевременное обслуживание, основанное на данных моделирования, позволяет поддерживать технику в хорошем состоянии и повышает ее остаточную стоимость при продаже или утилизации.

5.2 Прикладное использование моделирования наработки узлов и агрегатов специальной автомобильной техники аэропортов для предупреждения отказов и планирования ремонта

Организационные аспекты технического обслуживания аэродромных машин с учётом логистического обеспечения запасными частями ранее исследовались автором в работе [90]. В настоящем разделе данный подход развивается посредством количественной оценки затрат при различных сценариях ремонта и снабжения. Рассмотрим весь цикл ремонта специальной автомобильной техники в связи с отказом узла одного из важных компонентов. 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 др. в разных случаях вариантов действий при отказе.

Исходные данные для задачи:

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

Разберём наиболее часто применимую систему, оперативное регулирование срочного ремонта.

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 потребных запасных частей начинается ремонт техники. Спустя такое время специальная автомобильная техника снова находится в рабочем состоянии. Функция издержек принимает вид:

$$f(x) = \int_{t_0}^t R dt \quad (5.1)$$

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 простой техники во время ремонта, тогда:

$$f(x) = R_{ож} \cdot t_{ож} + R_{рем} \cdot t_{рем} \quad (5.2)$$

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

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

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

$t_{рем}$ – время простоя в ремонте.

Для данной задачи:

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

График издержек принимает вид рисунка 5.1

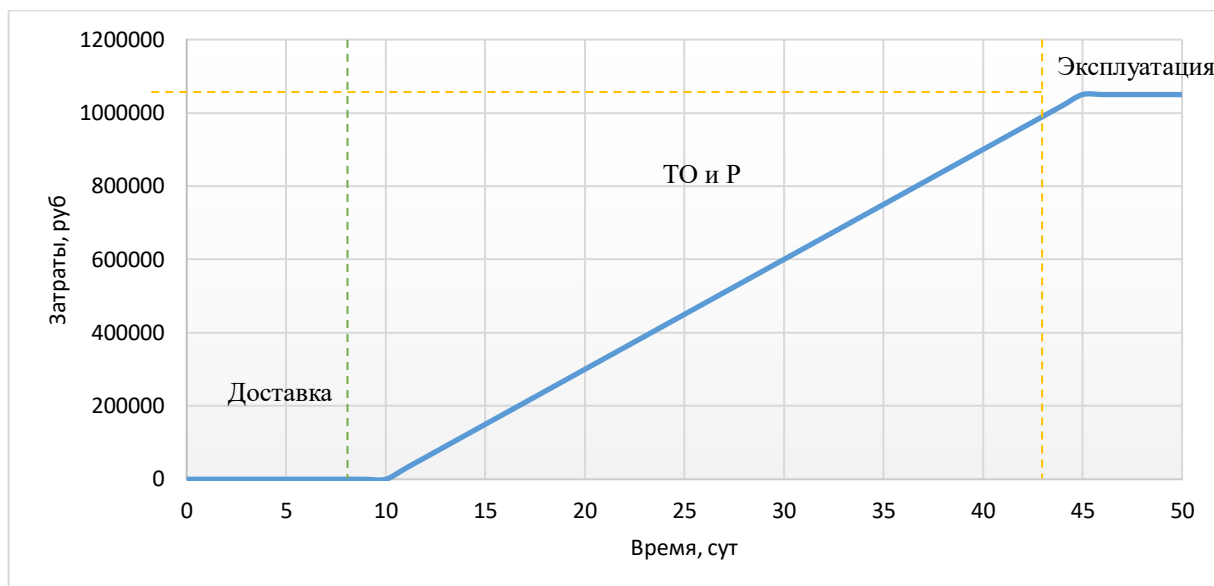


Рисунок 5.1 График издержек при оперативном ремонте специальной автомобильной техники

Второй вариант предупреждения внезапных отказов ведение базы необходимых 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

$$f(x) = R_{\text{ожЗП}} \cdot t_{\text{ожЗП}} + R_{\text{рем}} \cdot t_{\text{рем}} \quad (5.3)$$

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:

$$f(x) = 4\,000 \cdot 70 + 30\,000 \cdot 5 = 430\,000 \text{ руб}$$

А график издержек принимает вид рисунка 5.2.

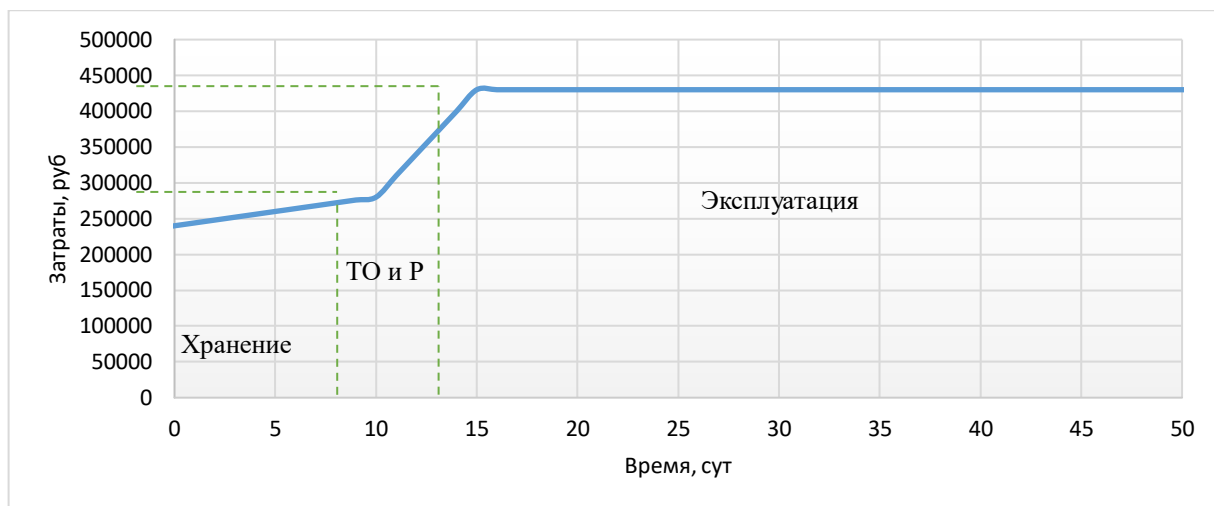


Рисунок 5.2 Издержки при хранении запасных частей

При использовании моделирования заключено, что средняя ошибка определения момента поломки варьируется в районе 10 суток. Это означает, что при использовании модели необходимая запасная часть может поступить на предприятия 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.

$$f(x) = \int_{t_0}^t R dt \quad (5.4)$$

Результаты приведены в таблице 5.1. График издержек на рисунке 5.3.

Таблица 5.1 – Издержки при разных ошибках моделирования

Ошибка моделирования, сут с момента отказа	Итоговые издержки, руб
-10	190 000
-9	186 000
-8	182 000
-7	178 000
-6	174 000
-5	170 000
-4	166 000
-3	162 000
-2	158 000
-1	154 000
0	150 000
1	180 000
2	210 000
3	240 000
4	270 000

5	300 000
6	330 000
7	360 000
8	390 000
9	420 000
10	450 000

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

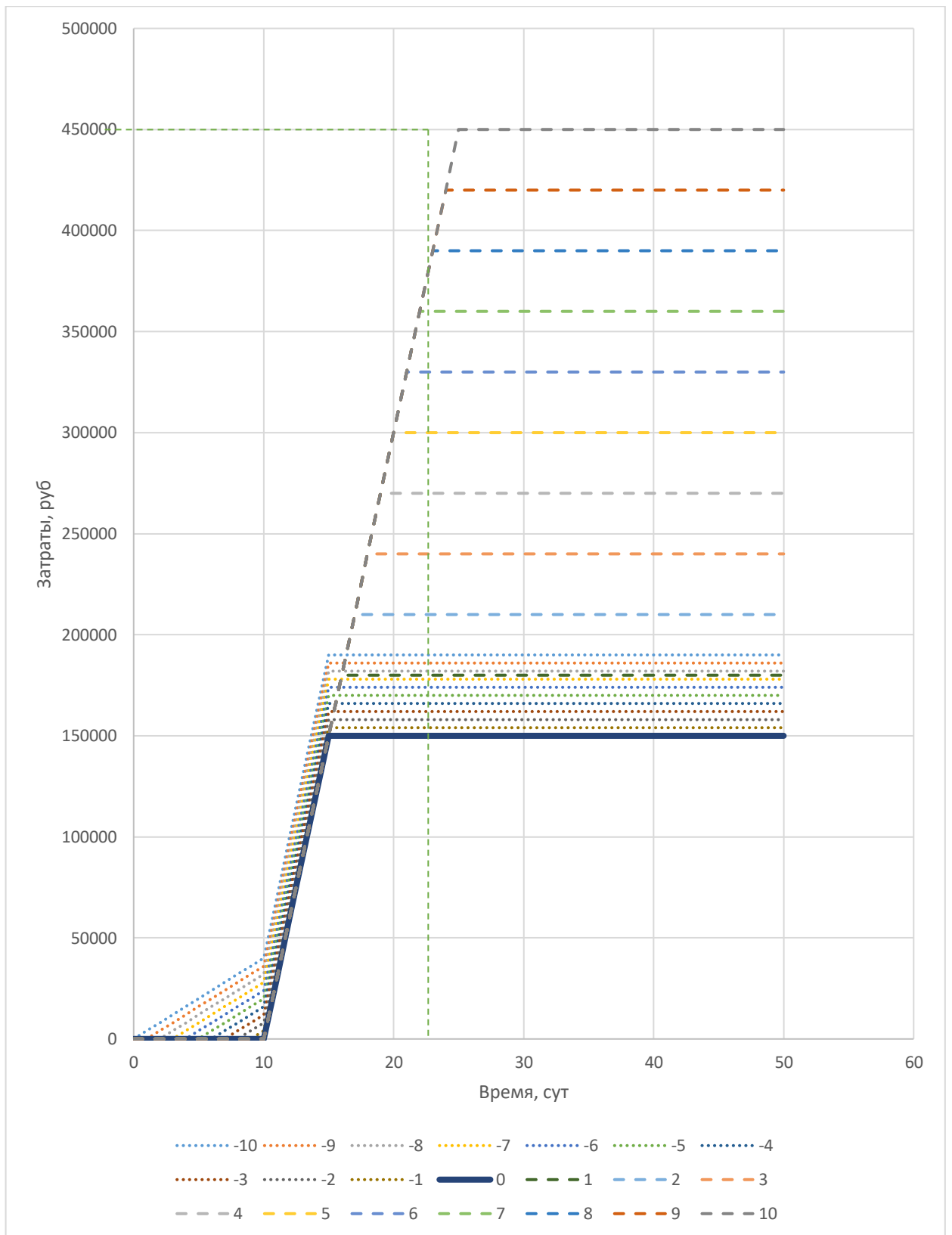


Рисунок 5.3 – График издержек при разных ошибках моделирования сроков поставки запасных частей

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. Лишь в 28% случаев итоговые затраты превысят данный порог, однако затраты при использовании других стратегий превышают это значение более чем в два раза. Лишь при критической ошибке в использовании модели общие издержки превышают результаты других стратегий снабжения запасными частями.

Данные расчёты верны для большинства случаев применения метода моделирования отказов, однако с 10% вероятностью реальные значения могут превышать показанные нормы. Это связано с неправильным применением моделирования, недостаточными или неверными исходными данными, неопределёнными обстоятельствами. Итоговое сравнение методов приведено на рисунке 5.4.

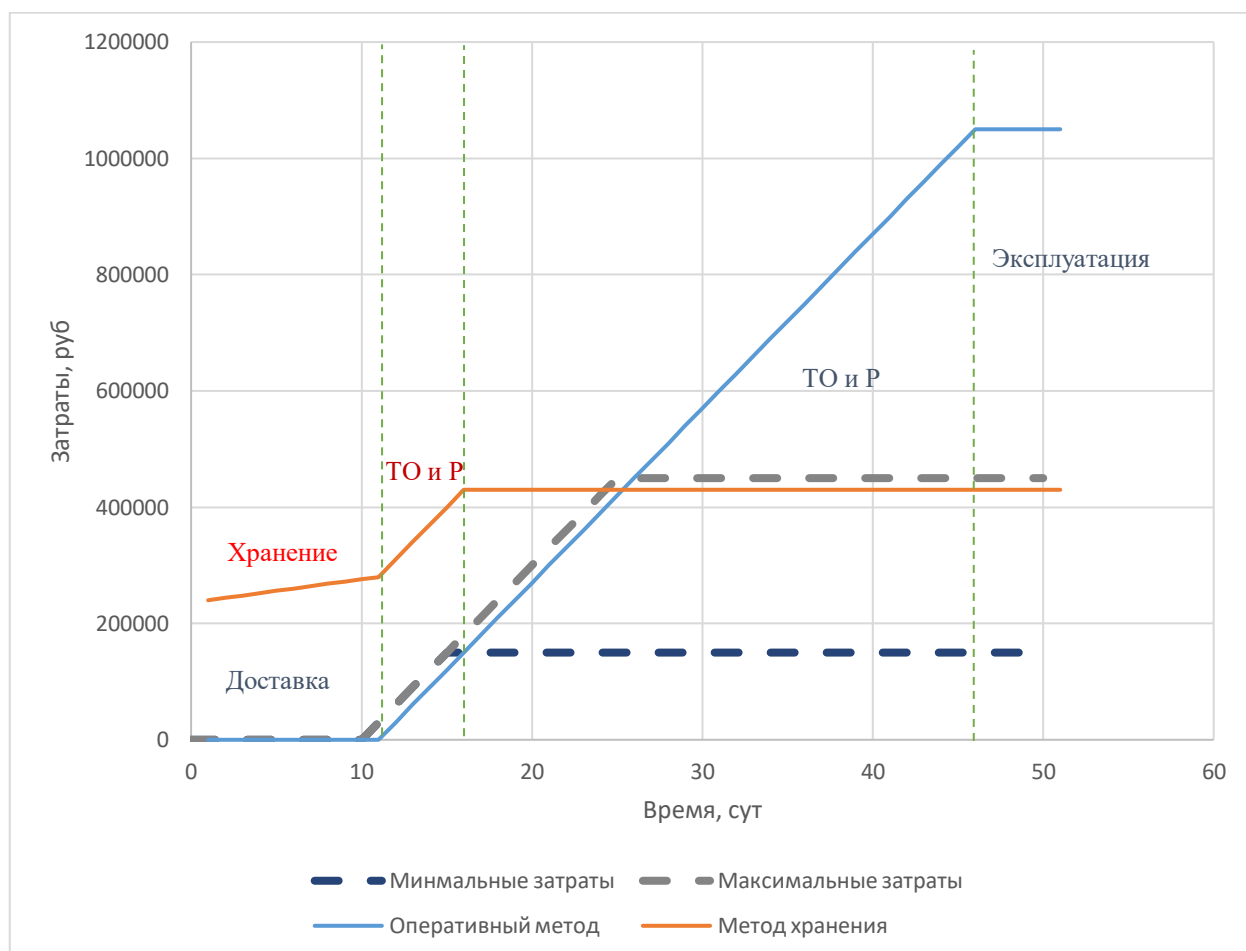


Рисунок 5.4 – Сравнение затрат применения разных методов снабжения запасными частями

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 выпора поставщиков запасных частей при срочном ремонте – скорость поставки. В момент непредвиденной поломки из-за издержек простоя предприятие зачастую может выбрать менее качественных поставщиков менее качественных запасных частей 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 ремонт и ТО, повысить надежность техники, улучшить планирование работ и обеспечить безопасность эксплуатации.

5.3 Стратегия внедрения имитационного моделирования прогнозирования моментов времени потребности в запасных частях

Для эффективного внедрения методики моделирования предприятие должно так же внедрить систему сбора статистических данных номенклатуры отдельных, критически важных и узко специализированных агрегатов специальной

автомобильной техники, для которых применение метода имеет смысл. Такая система должна содержать данные о:

- истории отказов, включая, дату, тип, причину отказа, время наработки до отказа, стоимости ремонта/замены;
- условиях эксплуатации, режиме работы узла, внешних факторов, сопутствующих графикам работы агрегата;
- дате проведения ТО, объеме работ, их стоимости.
- конструктивных особенностях агрегатов;
- данных о поставщиках комплектующих, их надежности, качестве запасных частей;
- затратах на жизненный цикл агрегата, стоимость приобретения, хранения, монтажа, эксплуатации, обслуживания, утилизации;

Важно, чтобы система сбора данных была автоматизирована насколько это возможно, интегрирована с другими информационными системами предприятия и обеспечивала достоверность и полноту собираемой информации. Также необходимо предусмотреть возможность анализа собранных данных для выявления закономерностей и трендов, что позволит повысить точность моделей и эффективность принятия решений по управлению надежностью специальной автомобильной техники.

Внедрение имитационного моделирования для прогнозирования моментов времени потребности в запасных частях сложный процесс. Для оптимального внедрения необходимо выполнение следующих условий.

Чёткое определение цели интеграции моделирование на предприятие, учитывая характер моделирования, область и номенклатура агрегатов, подверженных использованию моделирования, определение значений показателей эффективности от использования системы, снижения затрат, оптимизации логистики и т.д. [206].

Необходимо предварительно определить экономическую целесообразность внедрения метода, так как показанные в работе расчёты применены для конкретных условий, таких как использование специальной автомобильной

техники, ежегодный пассажиропоток аэропортов из которого следует потребность в использовании и интенсивности использования специальной автомобильной техники.

Самым трудоёмким этапом внедрения является сбор статистических данных. На предприятиях так или иначе собирается статистика ремонтов и их типов. Для внедрения системы моделирования эта информация должна быть обработана и соединена в единую базу данных системы снабжения, включающую в себя данные не только от технической службы, но и от логистической. Статистика отказов, данные о поставках, времени доставки запасных частей от разных поставщиков, стоимость доставки, минимальные партии заказа, информация об оборудовании, его качественных характеристиках, ожидаемый ресурс, наработка до отказа, условия эксплуатации, данные о запасах, стоимости содержания.

Описанная методика в главе 3 применима для разных видов программного обеспечения. Созданное в главе 4 ПО для применения метода моделирования наработки узлов специальной автомобильной техники для прогнозирования моментов времени потребности в запасных частях может быть имплементировано в любой сфере, однако путём разработки собственного интегрированного набора инструментов в существующие системы, используемые на предприятии может быть быстрее, проще, может пользоваться уже созданной базой данных аэропортов. Существует множество инструментов для выполнения моделирования, выбор зависит от сложности задачи, бюджета и доступных ресурсов. Важно, чтобы ПО поддерживало статистический анализ и визуализацию результатов.

Разработанная модели может быть использована с изменением зависимостей для конкретных условий эксплуатации на каждом отдельном предприятии и сфере применения. Так же возможно изменение ил добавление новых факторов, требуемых к учёту во время моделирования.

После необходимо провести верификацию результатов моделирования, путём имитации сценариев уже прошедших циклов ремонта и жизни запасных частей на предприятии. Действительная интеграция математических моделей в бизнес-процессы предприятий требует тестирования большего количества

параметров, изменения переменных моделирования, степени влияния неопределённости на результаты моделирования и т.п.

Оценка влияния различных стратегий управления запасами для разных условий эксплуатации может показать разный результат в разных сферах применения моделей. Для более точной оценки необходима интеграция модели с системой управления запасами и поставщиками.

После внедрения необходимо регулярное обновление данных наработки для самообучения модели на основе корректировки данных наработки, выработки, ресурса, изменения цен на запасные части. Регулярный анализ результатов моделирования и внесение корректировок для повышения точности и эффективности моделирования – ключевой момент оптимальной интеграции методики.

Для наглядности результатов использования моделирования необходима система визуализации результатов для наблюдения динамики изменения общих затрат и убытков от простоя специальной автомобильной техники.

Применение имитационного моделирования позволяет получить значительный экономический эффект эксплуатантам техники путем оптимизации затрат на управление материально-техническими запасами для специальной автомобильной техники аэропортов.

Действия по интеграции имитационного моделирования в бизнес-процессы предприятия должны обеспечивать определение целей и задач, аккумулирование и аналитику данных, определение практико–ориентированных программных продуктов и получение, в конечном счете, корректных и эффективных результатов деятельности эксплуатантов специальной автомобильной техники аэропортов.

Вышеуказанные процессы сложны в реализации из-за нестабильности рынка и поставщиков запасных частей для специальной автомобильной техники аэропортов, а также в связи с ограниченностью информации о состоянии парка техники эксплуатантов в Российской Федерации. Однако, аккумулировав данные о состоянии парка техники и применив методы имитационного моделирования,

может обеспечить снижение затрат на доставку, хранение запасных частей и проведение соответствующих ремонтных работ.

Успешная реализация данной стратегии поможет предприятию перейти от оперативного подхода к управлению запасами деталей (реагировать на отказы) к превентивному, что значительно повысит эффективность работы и конкурентоспособность компании в целом.

5.4 Процесс работы комплексной системы обеспечения запасными частями специальной техники в аэропортах

Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года, утверждённая распоряжением Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-р, закрепляет в качестве одного из целевых ориентиров развитие транспортно-логистической инфраструктуры на основе цифровых технологий и переход к модели управления жизненным циклом транспортных средств, при которой ключевое значение приобретают не столько реактивные меры по устранению возникших отказов, сколько упреждающие механизмы прогнозирования и предупреждения. Применительно к воздушному транспорту данный тезис конкретизирован в подпрограмме «Гражданская авиация» и в Комплексном плане модернизации и расширения магистральной инфраструктуры, где аэропортовая инфраструктура рассматривается как единый производственный комплекс, непрерывность функционирования которого определяется в том числе состоянием парка наземной специальной автомобильной техники (САТ). Московский авиационный узел, объединяющий аэропорты Шереметьево, Домодедово, Внуково и Жуковский, концентрирует на своих перронах и в зонах технического обслуживания наиболее разнородный в стране парк САТ - от перронных автобусов и топливозаправщиков до машин противообледенительной обработки и аэродромных тягачей, значительная часть которого эксплуатируется в постгарантийном периоде без системной поддержки со стороны заводов-изготовителей.

Именно эта особенность - сочетание высокой интенсивности эксплуатации, климатической агрессивности среднерусского региона, санкционного давления на каналы поставок оригинальных комплектующих и разнородности парка - формирует объективную потребность в переходе от традиционной реактивной модели снабжения, при которой закупка запасных частей инициируется фактом отказа, к предиктивной модели, опирающейся на вероятностное моделирование наработки узлов и агрегатов до достижения предельного состояния. Разработанная в главе 3 математическая модель имитации наработки и её программная реализация, описанная в главе 4, представляют собой ядро такой предиктивной модели, однако их практическая ценность реализуется только при встраивании в целостный организационно-технологический контур, охватывающий сбор эксплуатационных данных, прогнозирование потребности, формирование заявок, контрактацию, логистику, складирование, ремонт и последующий анализ фактического потребления. Настоящий раздел посвящён описанию именно такого целостного контура. Отдельные организационные принципы интегрированной логистической поддержки аэродромной техники Московского авиационного узла были рассмотрены автором ранее [12]. В настоящей работе данный подход развивается до комплексной системы, объединяющей прогнозирование потребности, закупку, логистику, складское обеспечение и процессы технического обслуживания и ремонта.

Логика изложения в разделе подчинена последовательности производственного цикла: от формирования исходных данных и прогнозирования потребности (подраздел 5.4.1) через процедуры закупок и управления цепями поставок (подраздел 5.4.2), складское хранение и внутреннее распределение (подраздел 5.4.3), процесс технического обслуживания и ремонта (подраздел 5.4.4) к завершающему аналитическому контуру, обеспечивающему обратную связь и адаптацию системы (подраздел 5.4.5). Каждый из этих этапов в равной степени значим для достижения конечной цели - поддержания коэффициента технической готовности парка САТ на уровне, не допускающем срыва полётного расписания, - однако именно первый этап, прогнозирование потребности, выступает тем

фильтром, от качества работы которого зависит эффективность всех последующих звеньев.

Таким образом, предлагаемый процесс обеспечения САТ запасными частями целесообразно рассматривать не как линейную последовательность отдельных операций, а как единую замкнутую систему, в которой результаты каждого этапа используются на последующих стадиях и одновременно формируют информационную обратную связь. Обобщённая архитектура комплексной системы, отражающая взаимосвязь процессов прогнозирования, закупок, складского обеспечения, технического обслуживания и последующего анализа, представлена на рисунке 5.5. Центральным элементом данной архитектуры выступает разработанная имитационная модель наработки, обеспечивающая информационное взаимодействие между основными функциональными блоками системы.



Рисунок 5.5 - Блок-схема комплексной системы обеспечения техники запасными частями

Следует подчеркнуть, что изложенная в разделе методика не является универсальной инструкцией, применимой без учёта специфики конкретного эксплуатанта. Практика взаимодействия с инженерно-техническими службами аэропортов МАУ, а также опыт, накопленный в ходе апробации разработанного программного обеспечения на статистических данных реальных эксплуатационных предприятий, показывают, что конфигурация системы определяется множеством локальных факторов: численностью и структурой парка, наличием собственной ремонтной базы, степенью интеграции с корпоративными информационными системами (в аэропортах Шереметьево и Домодедово это, как правило, собственные ERP-решения, во Внуково - комбинированные системы с элементами отечественных разработок), а также действующими на предприятии регламентами взаимодействия между службой главного инженера, службой материально-технического снабжения и производственно-диспетчерским отделом. Предлагаемая архитектура системы допускает масштабирование и адаптацию под конкретные условия, что подтверждено расчётами, приведёнными в подразделе 5.3.

5.4.1 Прогнозирование потребности в запасных частях

Прогнозирование потребности в запасных частях для парка специальной автомобильной техники аэропортов представляет собой, по существу, начальную точку всей цепочки материально-технического обеспечения, и от точности этого прогноза напрямую зависят все последующие управленческие решения: объём закупки, выбор контрагентов, уровень страхового запаса, периодичность планово-предупредительных ремонтов и, в конечном счёте, коэффициент технической готовности парка. Ошибка прогнозирования имеет двоякую природу: занижение потребности приводит к вынужденным простоям техники, а в условиях аэропорта - к каскадным задержкам рейсов и нарушению технологического графика наземного обслуживания воздушных судов; завышение потребности порождает иммобилизацию оборотного капитала в складских запасах, риски морального старения комплектующих и дополнительные расходы на содержание складской инфраструктуры. Практика эксплуатации аэропортов МАУ свидетельствует, что

доля неликвидных позиций в номенклатуре запасных частей САТ при традиционном реактивном подходе к снабжению достигает 15–20 процентов от общего складского запаса, тогда как доля вынужденных простоев по причине отсутствия критически важных компонентов остаётся на уровне 8–12 процентов от общего фонда времени простоя, что явно свидетельствует о наличии системной проблемы балансировки, решить которую можно только через переход к вероятностному моделированию.

Реализация такого перехода требует последовательного преобразования исходной эксплуатационной информации в количественно обоснованный прогноз потребности в запасных частях. Разработанная автором методика включает сбор и стратификацию данных о парке САТ, статистический анализ отказов, верификацию полученных распределений, имитационное моделирование и последующее формирование ранжированного плана потребности. Общая последовательность формирования прогностической модели представлена на рисунке 5.6.

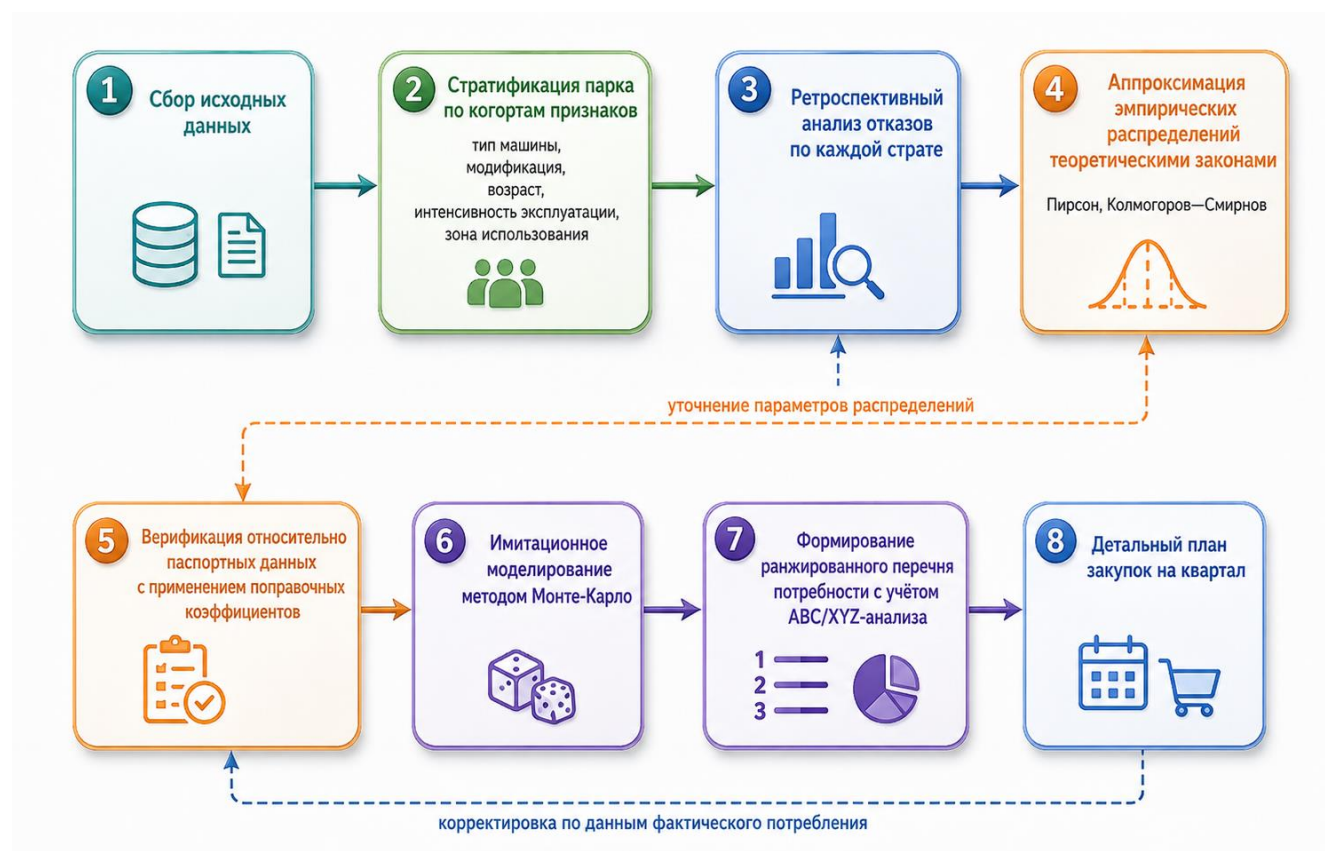


Рисунок 5.6 - Алгоритм стратификации парка техники и формирования прогностической модели

Фундаментом прогностической модели выступает массив исходных эксплуатационных данных, качество и полнота которого определяют верхнюю границу достижимой точности прогноза независимо от сложности применяемого математического аппарата. Сбор данных начинается с инвентаризации парка, причём под инвентаризацией понимается не формальное перечисление единиц техники по данным бухгалтерского учёта, а формирование детализированного регистра, в котором для каждой машины фиксируются: тип и заводская модификация, серийный номер и год выпуска, дата ввода в эксплуатацию, принадлежность к конкретному производственному подразделению (например, служба перронной техники, служба аэродромного содержания, служба горюче-смазочных материалов), фактическая наработка в моточасах или километрах пробега с момента последнего капитального ремонта, а также комплектация с указанием всех произведённых модификаций и дооснащений. Для аэропортов, эксплуатирующих технику зарубежного производства - машины противообледенительной обработки Vestergaard и TLD, аэродромные тягачи Schorff и Mallaghan, перронные автобусы Cobus и Neoplan, - особую сложность представляет идентификация каталожных номеров узлов, поскольку одна и та же машина в разных партиях поставки может комплектоваться агрегатами различных субпоставщиков, что требует обязательной сверки с индивидуальными спецификациями поставки.

Следующим по значимости источником данных являются журналы учёта отказов и выполненных ремонтных воздействий. В соответствии с Федеральными авиационными правилами, регламентирующими требования к наземному обслуживанию воздушных судов и содержанию аэродромной инфраструктуры, каждая неисправность САТ, влияющая на технологический процесс, подлежит обязательной регистрации с указанием даты и времени обнаружения, условий возникновения (характер выполняемой операции, погодные условия, наработка с начала смены), описания симптомов, выполненных диагностических процедур, перечня заменённых узлов и суммарной трудоёмкости восстановления. Качество ведения этой первичной документации в аэропортах МАУ неоднородно: если в

Шереметьево с 2019 года действует электронная система учёта на базе собственного ИТ-подразделения, а в Домодедово внедрена корпоративная система управления техническим обслуживанием, то в ряде служб Внуково и Жуковского часть данных до сих пор ведётся в бумажных журналах с последующим ручным переносом в электронные таблицы, что неизбежно порождает потери информации и затрудняет формирование репрезентативной выборки. Разработанная в настоящей работе методика предполагает стандартизацию формы первичного учёта и её интеграцию с модулем сбора данных имитационной модели, что позволяет минимизировать влияние человеческого фактора на входе системы.

Отдельного внимания заслуживает вопрос телематического обеспечения. Современные образцы САТА, как отечественного производства (КАМАЗ, МАЗ, Урал в аэродромном исполнении, техника производства ЗАО «Меркатор Холдинг»), так и зарубежного, штатно оснащаются бортовыми диагностическими системами, фиксирующими параметры работы двигателя, трансмиссии, гидравлических систем, а в ряде случаев - и вибрационные характеристики несущих конструкций. Данные бортовой диагностики, передаваемые через протоколы CAN-шины и агрегируемые телематическими шлюзами, представляют собой наиболее ценный источник информации для предиктивного моделирования, поскольку позволяют отслеживать деградацию параметров не дискретно, по факту обращения в ремонтную службу, а непрерывно. Вместе с тем следует учитывать, что для значительной части парка, находящегося в эксплуатации свыше десяти лет, штатная телематика либо отсутствует, либо функционирует в ограниченном режиме, что требует либо дооснащения машин внешними диагностическими модулями, либо опоры на данные периодических инструментальных обследований в рамках технического обслуживания ТО-1 и ТО-2, регламентированного Положением о техническом обслуживании и ремонте автотранспортных средств.

Собранная совокупность данных подвергается процедуре стратификации парка, смысл которой состоит в выделении групп техники со сходными профилями нагружения и, как следствие, со сходными закономерностями деградации узлов. Критериями стратификации выступают тип машины (тягач, топливозаправщик,

деайсер, перронный автобус, снегоуборочная машина), заводская модификация, возрастная когорта (до пяти лет, от пяти до десяти, свыше десяти), интенсивность эксплуатации (среднесуточная наработка в моточасах) и зона преимущественного использования (перрон, взлётно-посадочная полоса, техническая территория). Стратификация необходима по двум причинам. Первая - статистическая: выборки по отдельным типам машин и возрастным когортам оказываются достаточно представительными для применения методов математической статистики, тогда как агрегированная выборка по всему парку размывает специфические закономерности. Вторая - эксплуатационная: разные группы техники имеют различные профили риска и, соответственно, различные приоритеты в системе снабжения. Машины противообледенительной обработки, интенсивно эксплуатируемые в зимний период и простаивающие летом, имеют принципиально иной характер нагружения гидравлических систем по сравнению с перронными автобусами, работающими в равномерном круглосуточном режиме, и эти различия должны быть отражены в прогностической модели явно.

В рамках каждой выделенной страты проводится ретроспективный анализ массива данных об отказах и выполненных ремонтных воздействиях, в ходе которого вычисляются базовые показатели надёжности: средняя наработка на отказ (MTBF) для каждого критического узла, параметры потока отказов, эмпирические функции распределения наработки до отказа. Последовательность вычислений соответствует методике, изложенной в главе 3: эмпирические распределения аппроксимируются теоретическими законами (нормальным, логнормальным, Вейбулла, гамма-распределением), выбор наилучшей аппроксимации осуществляется по критериям согласия Пирсона и Колмогорова–Смирнова с поправкой на объём выборки. Для узлов с малым числом зарегистрированных отказов (менее десяти наблюдений) применяется процедура объединения выборок по возрастным когортам с последующей коррекцией параметров через поправочные коэффициенты, что позволяет сохранить статистическую значимость оценок без потери специфики конкретной страты.

Критически важным этапом является верификация полученных оценок относительно паспортных данных заводов-изготовителей. Практика показывает, что фактические значения MTBF для узлов SATA, эксплуатируемой в условиях аэропортов МАУ, систематически отклоняются от паспортных в сторону уменьшения - в среднем на 15–30 процентов для гидравлических компонентов, на 10–25 процентов для узлов трансмиссии, на 20–40 процентов для резинометаллических изделий и уплотнений. Основные причины расхождения - климатическая и техногенная агрессивность среды аэродрома: циклические перепады температур в диапазоне от минус тридцати до плюс тридцати пяти градусов по Цельсию, воздействие противогололёдных реагентов на основе формиатов и ацетатов, абразивное воздействие пескосоляных смесей в зимний период, ультрафиолетовая деградация полимерных компонентов в летний период, а также режим эксплуатации с частыми пусками-остановами и переменными нагрузками, существенно отличающийся от стационарных режимов, для которых проектировалась техника. Эти факторы учитываются в модели через систему поправочных коэффициентов, методика расчёта которых приведена в подразделе 5.2, а численные значения для основных категорий узлов - в приложениях к диссертации.

Математический аппарат прогнозирования, реализованный в разработанном программном обеспечении (глава 4), базируется на методе имитационного моделирования Монте-Карло, при котором для каждого узла генерируется ансамбль траекторий наработки до отказа в соответствии с параметрами выбранного распределения, а момент возникновения потребности в запасной части определяется как квантиль соответствующего порядка от распределения времени до отказа. Выбор уровня квантиля задаётся политикой снабжения конкретного эксплуатанта: для узлов категории критичности А, отказ которых парализует технологический процесс, целесообразно ориентироваться на 90–95-й процентиль, для узлов категории В - на 70–80-й, для расходных материалов категории С - на медиану или ниже. Такой дифференцированный подход позволяет балансировать

между риском дефицита и затратами на содержание запаса, избегая как чрезмерной иммобилизации капитала, так и недопустимых простоев.

Принципиальным преимуществом имитационного подхода перед классическими детерминированными методиками расчёта потребности (по удельным нормам расхода на тысячу километров пробега или на тысячу моточасов, по нормативам периода между плановыми ремонтами) является способность воспроизводить стохастическую природу процессов деградации и учитывать нелинейные эффекты. В частности, модель корректно отражает тот факт, что для узлов с растущей интенсивностью отказов (типичный случай усталостной деградации, описываемой распределением Вейбулла с параметром формы больше единицы) потребность в запасных частях нарастает нелинейно по мере старения парка, и планирование закупок, основанное на усреднённых нормах, неизбежно приводит к дефициту в поздние периоды эксплуатации. Именно этот эффект, зафиксированный в ходе ретроспективного анализа данных по парку перронных автобусов одного из аэропортов МАУ, стал одним из практических обоснований необходимости перехода к имитационной модели.

Вместе с тем следует признать, что исключительно вероятностные методы имеют ограниченную эффективность при прогнозировании редких событий, обусловленных скрытыми производственными дефектами, нештатными режимами эксплуатации или внешними воздействиями (например, повреждениями техники при столкновениях на перроне, которые, по данным служб безопасности аэропортов, составляют до пяти процентов всех инцидентов с САТ). Для компенсации этой неопределённости в вычислительный контур интегрируется блок экспертных оценок: инженеры службы технического обслуживания и ремонтные бригады, обладающие многолетним опытом работы с конкретными типами машин, формируют корректирующие поправки к параметрам распределений для узлов, по которым статистическая выборка недостаточна или нерепрезентативна. Формализация экспертных суждений осуществляется через процедуру парных сравнений с построением матрицы приоритетов, что снижает субъективность оценок и позволяет документировать их для последующего аудита.

Сезонный фактор выделяется в модели в самостоятельный компонент. Для аэропортов средней полосы России сезонность эксплуатации САТА выражена исключительно резко: машины противообледенительной обработки и снегоуборочная техника концентрируют до 80 процентов годовой наработки в период с ноября по март, тогда как машины для мойки перронов и полива территории, напротив, практически не эксплуатируются в зимний период. Прогноз потребности в запасных частях для таких машин строится с учётом опережающего формирования запаса к началу сезона: для деайсеров и снегоуборочных машин критические позиции (гидравлические насосы, распределители, щётки, плужные ножи, форсунки распылителей реагентов) должны находиться на складе не позднее середины октября, что требует размещения заказов в летний период, когда заводы-изготовители и поставщики менее загружены и способны обеспечить более короткие сроки поставки. Летний сезон, в свою очередь, характеризуется повышенным спросом на компоненты систем охлаждения двигателей, кондиционирования кабин, пневматических систем, а также на шины, износ которых в тёплый период на бетонном покрытии перрона существенно интенсифицируется.

По результатам работы прогностической модели формируется ранжированный перечень номенклатурных позиций с указанием прогнозируемого момента возникновения потребности, рекомендуемого объёма закупки и уровня приоритета. Этот перечень подвергается процедуре ABC-анализа, при которой позиции категории А (критические для технологического процесса и наиболее капиталоемкие) формируются с приоритетом минимизации риска дефицита, позиции категории В допускают использование взаимозаменяемых аналогов и плановое пополнение по графику, а позиции категории С закупаются по факту возникновения потребности. Одновременно выполняется XYZ-анализ по стабильности потребления, что позволяет выделить позиции с равномерным потреблением, пригодные для автоматизированного пополнения по модели точки перезаказа, и позиции с эпизодическим характером спроса, для которых целесообразно индивидуальное планирование.

Итоговым документом этапа прогнозирования является детальный план закупок запасных частей на плановый период (как правило, квартал, с разбивкой по месяцам), содержащий для каждой позиции: унифицированное наименование, каталожный артикул, количество, ориентировочную стоимость, директивные сроки поставки, рекомендуемый уровень страхового запаса и идентификаторы приоритетных поставщиков из реестра квалифицированных контрагентов. План согласовывается с финансовой службой аэропорта в части соответствия бюджету материально-технического обеспечения и утверждается руководством службы главного инженера. Следует особо отметить, что в условиях волатильности цен на комплектующие зарубежного производства, обусловленной курсовыми колебаниями и логистическими ограничениями, стоимостные оценки в плане закупок носят индикативный характер и подлежат уточнению на этапе контрактации; тем не менее, именно на этапе прогнозирования закладывается общая структура расходов и приоритеты финансирования.

Процесс прогнозирования не является однократным актом - он реализуется в режиме скользящего планирования с горизонтом пересмотра один квартал и возможностью внеплановой корректировки при выявлении значимых отклонений фактического потребления от прогнозных значений. Такой режим обеспечивает адаптивность системы к изменениям эксплуатационной обстановки: вводу в эксплуатацию новых типов техники, изменению интенсивности полётов (что особенно проявилось в период восстановления пассажиропотока после 2022 года), модернизации существующего парка, смене поставщиков комплектующих. Механизм обратной связи, обеспечивающий пересмотр параметров модели по данным фактического потребления, подробно рассмотрен в подразделе 5.4.5; здесь же важно зафиксировать, что прогностический контур работает не изолированно, а в составе замкнутой системы управления, где каждое отклонение факта от прогноза становится основанием для уточнения модели.

Завершая описание этапа прогнозирования, следует вернуться к связи с разработанным программным обеспечением. Имитационная модель, представленная в главе 4, функционирует в составе описанного контура как

вычислительное ядро: входными данными для неё служат верифицированные массивы эксплуатационной статистики, а выходными - распределения моментов возникновения потребности по каждой номенклатурной позиции. Программный модуль интегрируется с корпоративной информационной системой эксплуатанта через интерфейсы обмена данными, что исключает необходимость ручного ввода и снижает трудоёмкость формирования прогноза. Расчёт экономической эффективности применения данной модели в сравнении с традиционными стратегиями снабжения приведён в подразделе 5.1, а практические примеры её применения на данных реальных эксплуатационных предприятий - в подразделе 5.2.

5.4.2 Управление закупками и цепями поставок

Переход от этапа прогнозирования потребности к этапу контрактации и физического обеспечения склада запасными частями представляет собой, по существу, переход от вычислительной плоскости к плоскости операционной логистики, в которой математические модели, разработанные в главах 3 и 4, начинают взаимодействовать с реальными рыночными, правовыми и организационными ограничениями. Если прогностический контур отвечает на вопрос «что, в каком количестве и к какому моменту времени потребуется», то контур закупок и цепей поставок отвечает на вопросы «у кого приобретать, на каких условиях, каким маршрутом доставлять и как минимизировать риски срыва этих поставок». Связь между этими двумя контурами двусторонняя: с одной стороны, результаты имитационного моделирования задают параметры технического задания на поставку и директивные сроки, с другой - фактические характеристики рынка поставщиков (сроки производства, логистические плечи, условия контрактации) возвращаются в прогностическую модель в виде поправочных коэффициентов, обеспечивая её адекватность.

Нормативно-правовой фундамент закупочной деятельности аэропортов определяется их организационно-правовой формой. Крупнейшие аэропорты Московского авиационного узла - АО «Международный аэропорт Шереметьево»,

АО «Международный аэропорт Домодедово», АО «Международный аэропорт Внуково» - являются акционерными обществами с существенной долей государственного участия, что накладывает на их закупочную деятельность действие Федерального закона от 18 июля 2011 г. № 223-ФЗ «О закупках товаров, работ, услуг отдельными видами юридических лиц». Это означает, что процедуры выбора поставщиков запасных частей для специальной автомобильной техники должны осуществляться на конкурентной основе, с обязательным размещением извещений в единой информационной системе и соблюдением установленных законом сроков. Вместе с тем специфика номенклатуры - значительная доля уникальных, патентно-защищённых компонентов зарубежного производства, отсутствие альтернативных поставщиков по ряду позиций - объективно ограничивает применение конкурентных процедур и вынуждает эксплуатантов использовать положения закона о закупках у единственного поставщика, что, в свою очередь, требует тщательного документального обоснования.

Особое место в нормативном регулировании занимает Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года, в которой в качестве приоритетного направления закреплена импортозависимость транспортной отрасли и необходимость формирования отечественной компонентной базы для критически важных видов техники. Применительно к парку специальной автомобильной техники аэропортов эта установка вступает в острое противоречие с фактическим состоянием парка: по оценкам отраслевых экспертов, доля техники зарубежного производства (европейского, американского, китайского) в аэропортах МАУ превышает 70 процентов, а средний возраст эксплуатируемых машин составляет 10–15 лет. Это означает, что в среднесрочной перспективе - на горизонте 5–7 лет, охватываемом настоящим исследованием, - парк будет сохранять преимущественно иностранную компонентную базу, и задача обеспечения его запасными частями будет решаться в условиях санкционных ограничений, разрыва прямых контрактов с заводами-изготовителями и необходимости выстраивания обходных логистических маршрутов через третьи страны.

Практика аэропортов МАУ за 2022–2025 годы свидетельствует о формировании трёх типичных моделей снабжения, каждая из которых имеет собственные риски и издержки. Первая модель - параллельный импорт через страны ЕАЭС и Центральной Азии (Турция, ОАЭ, Казахстан, Кыргызстан), - позволяет сохранять доступ к оригинальным комплектующим европейских и американских производителей, но увеличивает логистическое плечо в среднем на 40–60 процентов, порождает риски задержек на таможне и существенно повышает стоимость единицы продукции за счёт множественных посреднических наценок. Вторая модель - переход на компоненты китайского производства, - обеспечивает снижение стоимости и стабильность поставок, однако требует проведения дорогостоящих работ по адаптации и верификации совместимости, а также сопряжена с рисками снижения ресурса узлов. Третья модель - восстановление и регенерация собственных узлов силами ремонтных предприятий аэропорта или привлечённых подрядчиков, - позволяет снизить зависимость от импорта, но требует создания собственной производственной базы и квалифицированного инженерного персонала.

Разработанная в настоящей работе методика не предписывает жёсткого выбора одной из этих моделей - напротив, она предполагает их комбинирование в зависимости от категории критичности запасной части. Для узлов категории А, отказ которых парализует технологический процесс (гидравлические насосы рулевого управления аэродромных тягачей, электронные блоки управления двигателем машин противообледенительной обработки), приоритет отдаётся параллельному импорту с формированием страхового запаса на горизонт 6–9 месяцев. Для узлов категории В, по которым существует китайская альтернатива, - переход на компоненты из КНР с параллельной отработкой процедуры входного контроля и стендовых испытаний. Для расходных материалов категории С и для узлов, поддающихся регенерации, - развитие собственной ремонтной базы. Имитационная модель, представленная в главе 4, позволяет количественно оценить экономический эффект каждой из этих стратегий для конкретного эксплуатанта с учётом его парка, структуры отказов и действующих логистических тарифов.

Процедура селекции поставщиков в описанных условиях существенно усложняется по сравнению с довоенным периодом. Если ранее критерии выбора сводились преимущественно к ценовым параметрам и срокам поставки, то теперь в критериальную матрицу в обязательном порядке включаются: подтверждённая способность поставщика обеспечить легальный ввоз продукции на территорию Российской Федерации, наличие отлаженных таможенных процедур, репутация на рынке параллельного импорта, готовность предоставить гарантии подлинности комплектующих (что критично для узлов, влияющих на безопасность полётов), а также финансовая устойчивость самого поставщика в условиях санкционного давления. Практика Шереметьево и Домодедово показывает, что формирование пула квалифицированных поставщиков занимает в настоящее время от 3 до 6 месяцев и требует проведения процедур *due diligence*, включающих проверку бенефициарных владельцев, анализ финансовой отчётности, верификацию складских мощностей и производственных компетенций.

Контрактация запасных частей для специальной автомобильной техники имеет ряд особенностей, отличающих её от закупок для обычного автомобильного транспорта. Во-первых, значительная доля номенклатуры - это уникальные позиции с длительным производственным циклом (от 8 до 20 недель для гидравлических агрегатов, от 12 до 24 недель для электронных блоков управления), что требует опережающего размещения заказов задолго до момента фактической потребности, рассчитанного по имитационной модели. Во-вторых, поставщики часто устанавливают минимальные партии отгрузки, существенно превышающие потребность конкретного аэропорта, что вынуждает формировать консолидированные заказы либо через отраслевые объединения, либо через специализированных дистрибьюторов. В-третьих, для ряда позиций действует экспортный контроль стран-производителей, что делает невозможным приобретение комплектующих через официальные каналы и требует использования обходных схем, сопряжённых с дополнительными правовыми и финансовыми рисками.

Управление рисками в контуре поставок строится на трёх уровнях. Первый уровень - операционный, связанный с конкретными заказами: мониторинг статуса производства у поставщика, отслеживание прохождения таможенных процедур, превентивное выявление задержек. Второй уровень - тактический, связанный с портфелем заказов на квартал: диверсификация поставщиков по каждой критической позиции (не менее двух квалифицированных источников снабжения), формирование страхового запаса в объёме, рассчитанном по имитационной модели с учётом стохастической природы сроков поставки. Третий уровень - стратегический, связанный с долгосрочной устойчивостью системы снабжения: развитие отношений с отечественными производителями аналогов, инвестирование в собственную ремонтную базу, участие в отраслевых программах импортозамещения, инициированных Минтрансом России и Росавиацией.

Логистика поставок запасных частей для специальной автомобильной техники аэропортов имеет собственную специфику, связанную как с характеристиками грузов (крупногабаритные агрегаты, опасные грузы - гидравлические жидкости, аккумуляторные батареи, аэрозольные баллоны), так и с требованиями к срокам доставки. Для критических позиций, отказ по которым создаёт непосредственную угрозу безопасности полётов, применяется авиационная экспресс-доставка, стоимость которой в 5–8 раз превышает стоимость морской или автомобильной перевозки, но позволяет сократить срок поставки до 3–7 дней. Для плановых поставок, формируемых по результатам имитационного моделирования, используется мультимодальная логистика с комбинацией автомобильного, железнодорожного и морского транспорта, что позволяет снизить издержки при сохранении приемлемых сроков. Таможенное оформление международных поставок осуществляется с привлечением специализированных брокеров, имеющих статус уполномоченного экономического оператора, что позволяет сократить сроки выпуска товаров и минимизировать риски административных задержек.

Особую проблему представляет логистика поставок в зимний период, когда потребность в запасных частях для снегоуборочной техники и машин

противообледенительной обработки достигает пиковых значений, а пропускная способность транспортных коридоров, напротив, снижается из-за погодных условий и общей сезонной загрузки логистической инфраструктуры. Имитационная модель позволяет количественно оценить этот эффект и сформировать график опережающих закупок, при котором критические позиции поступают на склад в период с июля по сентябрь, до начала сезонного пика. Практика Внуково показывает, что такой подход позволяет снизить долю вынужденных простоев техники в зимний период на 35–40 процентов по сравнению с реактивной моделью снабжения.

Управление взаимоотношениями с поставщиками (Supplier Relationship Management, SRM) в современных условиях приобретает стратегическое значение. Транзакционные отношения, при которых каждый заказ размещается у наименее дорогого поставщика, оказываются неэффективными в условиях санкционной неопределённости: поставщик, не получающий стабильного долгосрочного портфеля заказов, не инвестирует в создание складских запасов под конкретного клиента и не гарантирует приоритетную отгрузку в периоды дефицита. Переход к стратегическому партнёрству, предполагающий совместное планирование потребностей, обмен данными о прогнозах потребления и производственных планах, взаимные обязательства по уровням сервиса, позволяет существенно повысить устойчивость системы снабжения. В аэропортах МАУ такая модель реализуется через заключение рамочных договоров с ключевыми поставщиками на срок 2–3 года с ежеквартальной корректировкой объёмов и номенклатуры на основании данных имитационного моделирования.

Цифровизация закупочных процессов выступает необходимым условием эффективной реализации описанной методики. Интеграция имитационной модели с корпоративной ERP-системой аэропорта и специализированными модулями управления цепями поставок (SCM) позволяет автоматизировать формирование заявок на закупку на основании результатов прогнозирования, исключить ручной ввод данных и связанные с ним ошибки, обеспечить сквозную прослеживаемость (traceability) каждой запасной части от момента размещения заказа до момента её

установки на технику. Практика Шереметьево, где с 2023 года действует интегрированная система управления материально-техническим обеспечением, показывает, что уровень автоматизации закупочных процессов достигает 75 процентов для позиций категории В и С и 60 процентов для позиций категории А (где сохраняется необходимость экспертной оценки и ручного согласования). Это позволяет сократить трудоёмкость формирования плана закупок в 3–4 раза и существенно повысить его точность.

Отдельного рассмотрения заслуживает вопрос ценообразования на запасные части в условиях санкционных ограничений. Рынок параллельного импорта характеризуется высокой волатильностью цен, обусловленной курсовыми колебаниями, изменением логистических тарифов, дефицитом отдельных позиций. Это создаёт существенные трудности для бюджетного планирования аэропортов, утверждающих сметы расходов на год вперёд. В качестве компенсирующего механизма применяется включение в контракты ценовых эскалационных оговорок, привязанных к официальным курсам валют и индексам логистических тарифов, а также формирование резервного фонда на покрытие ценовых рисков в объёме 10–15 процентов от годового бюджета на запасные части. Имитационная модель позволяет оценить вероятностное распределение затрат на снабжение с учётом волатильности цен и сформировать оптимальную структуру резервного фонда.

Важным элементом системы закупок является управление жизненным циклом самой номенклатуры запасных частей. Снятие с производства отдельных моделей специальной автомобильной техники (что характерно для парка, значительная часть которого выпущена в 2000-х - начале 2010-х годов) порождает проблему «последней закупки» (last-time buy), когда эксплуатант должен одновременно приобрести запас критически важных компонентов на оставшийся срок эксплуатации парка. Имитационная модель позволяет рассчитать оптимальный объём такой закупки, балансируя между риском дефицита в поздние периоды эксплуатации и затратами на иммобилизацию капитала в складских запасах. Практика показывает, что для узлов с длительным сроком службы (15–20 лет) объём «последней закупки» может достигать 3–5 годовых потребностей, что

требует существенных единовременных затрат, но в долгосрочной перспективе оказывается экономически оправданным.

Взаимодействие с отечественными производителями запасных частей и аналогов представляет собой отдельное направление, значение которого будет возрастать в среднесрочной перспективе. Российские предприятия - ЗАО «Меркатор Холдинг», ОАО «Могилёвский завод колёсных тягачей» (в части поставок в рамках Союзного государства), ряд предприятий малого и среднего бизнеса, специализирующихся на производстве аналогов для аэродромной техники, - постепенно расширяют номенклатуру выпускаемой продукции. Однако процесс квалификации отечественных аналогов требует проведения длительных стендовых испытаний, верификации совместимости с конкретными моделями техники, отработки технологических процессов установки. Имитационная модель позволяет оценить экономический эффект такого перехода, сопоставив снижение стоимости комплектующих и логистических издержек с затратами на квалификацию и рисками снижения ресурса.

Система ключевых показателей эффективности (KPI) контура закупок и цепей поставок включает, как правило, следующие индикаторы: уровень сервиса (доля заказов, выполненных в срок и в полном объёме), средний срок исполнения заказа от момента размещения до поступления на склад, стоимость владения складским запасом (в процентах от его средней стоимости), доля неликвидных позиций в номенклатуре, количество случаев вынужденных простоев по причине отсутствия запасных частей, отклонение фактических затрат на снабжение от плановых. Эти показатели формируются на основании данных ERP-системы и используются для регулярной (ежеквартальной) оценки эффективности функционирования контура, а также для калибровки параметров имитационной модели.

Завершая описание этапа управления закупками и цепями поставок, следует подчеркнуть его системообразующую роль в общей архитектуре комплексного обеспечения специальной автомобильной техники. Именно на этом этапе абстрактные результаты математического моделирования трансформируются в

конкретные управленческие решения - контракты с поставщиками, графики поставок, уровни страховых запасов, - от качества которых напрямую зависит коэффициент технической готовности парка и, в конечном счёте, бесперебойность функционирования аэропортовой инфраструктуры. Разработанная в настоящей работе методика, опирающаяся на имитационное моделирование и интегрированную с современными информационными системами управления, позволяет существенно повысить обоснованность этих решений и снизить совокупные издержки на материально-техническое обеспечение, что особенно значимо в условиях санкционного давления и структурной перестройки рынка запасных частей.

Переход от этапа закупок к этапу складского хранения и внутреннего распределения, рассматриваемому в следующем подразделе, осуществляется после прохождения запасными частями процедуры входного контроля качества и их постановки на складской учёт. Связь между этими этапами обеспечивается через систему адресного хранения, при которой каждая единица хранения имеет уникальный идентификатор, позволяющий отследить её происхождение, дату поступления, срок годности и текущий статус. Эта информация, аккумулируемая в системе WMS, служит входными данными для процессов внутреннего распределения и, одновременно, для обратной связи с прогностическим контуром, обеспечивая непрерывную адаптацию системы к изменяющимся условиям эксплуатации.

5.4.3 Организация складского хранения и внутреннего распределения

Переход от этапа контрактации и физической доставки запасных частей к этапу их складского хранения и последующего внутреннего распределения знаменует собой, по существу, смену режима функционирования всей системы материально-технического обеспечения. Если на предыдущих этапах ключевым параметром являлась скорость реакции на изменение внешней среды - рыночной конъюнктуры, логистических тарифов, таможенных процедур, - то на складе фокус смещается на внутреннюю стабильность: сохранение физико-механических

свойств комплектующих, поддержание точности учётных данных, обеспечение оперативного отклика на запросы ремонтных служб. При этом склад в архитектуре системы, разрабатываемой в настоящей работе, не является пассивным хранилищем - он выступает активным элементом прогностического контура, поскольку данные о фактическом расходе комплектующих, сроках их пребывания на складе и случаях деградации свойств возвращаются в имитационную модель в качестве корректирующих воздействий.

Нормативная база организации складского хозяйства аэропортов формируется совокупностью документов разного уровня. На федеральном уровне это Воздушный кодекс Российской Федерации, Федеральные авиационные правила «Требования к обеспечению аэродромов средствами наземного обслуживания воздушных судов», утверждённые приказом Минтранса России, а также отраслевые стандарты, регламентирующие условия хранения авиационно-технического имущества. На корпоративном уровне - внутренние регламенты конкретных аэропортов, которые, как показывает практика взаимодействия со службами Шереметьево, Домодедово и Внуково, существенно различаются по степени детализации и уровню автоматизации. Если в Шереметьево с 2020 года функционирует единая система управления складскими операциями на базе WMS-платформы, интегрированной с корпоративной ERP-системой, то в ряде подразделений Внуково учёт до сих пор ведётся с существенной долей ручных операций, что порождает риски расхождений между фактическими остатками и данными информационной системы.

Организация складского пространства начинается с задачи зонирования, решение которой определяется спецификой номенклатуры запасных частей для специальной автомобильной техники. В отличие от складов общего назначения, где преобладают унифицированные стеллажные конструкции, склад запасных частей САТ аэропорта должен одновременно обеспечивать хранение крупногабаритных агрегатов (гидравлические насосы, мосты, двигатели внутреннего сгорания), прецизионных электронных компонентов (блоки управления, датчики, модули CAN-шины), резинотехнических изделий (уплотнения, манжеты, рукава высокого

давления), химических реагентов (гидравлические жидкости, смазочные материалы, антиобледенительные составы) и опасных грузов (аккумуляторные батареи, аэрозольные баллоны). Каждая из этих категорий требует собственных условий размещения, собственных режимов хранения и собственных процедур обращения, что делает задачу зонирования многокритериальной.

С учётом различий в габаритах, условиях хранения, требованиях безопасности и интенсивности обращения отдельных групп комплектующих автором сформирована схема функционального зонирования склада запасных частей САТ. Она предусматривает пространственное разделение номенклатуры по условиям хранения при одновременной минимизации маршрутов внутреннего перемещения и времени комплектации заявок ремонтных подразделений. Предлагаемая схема организации складского пространства представлена на рисунке 5.7.

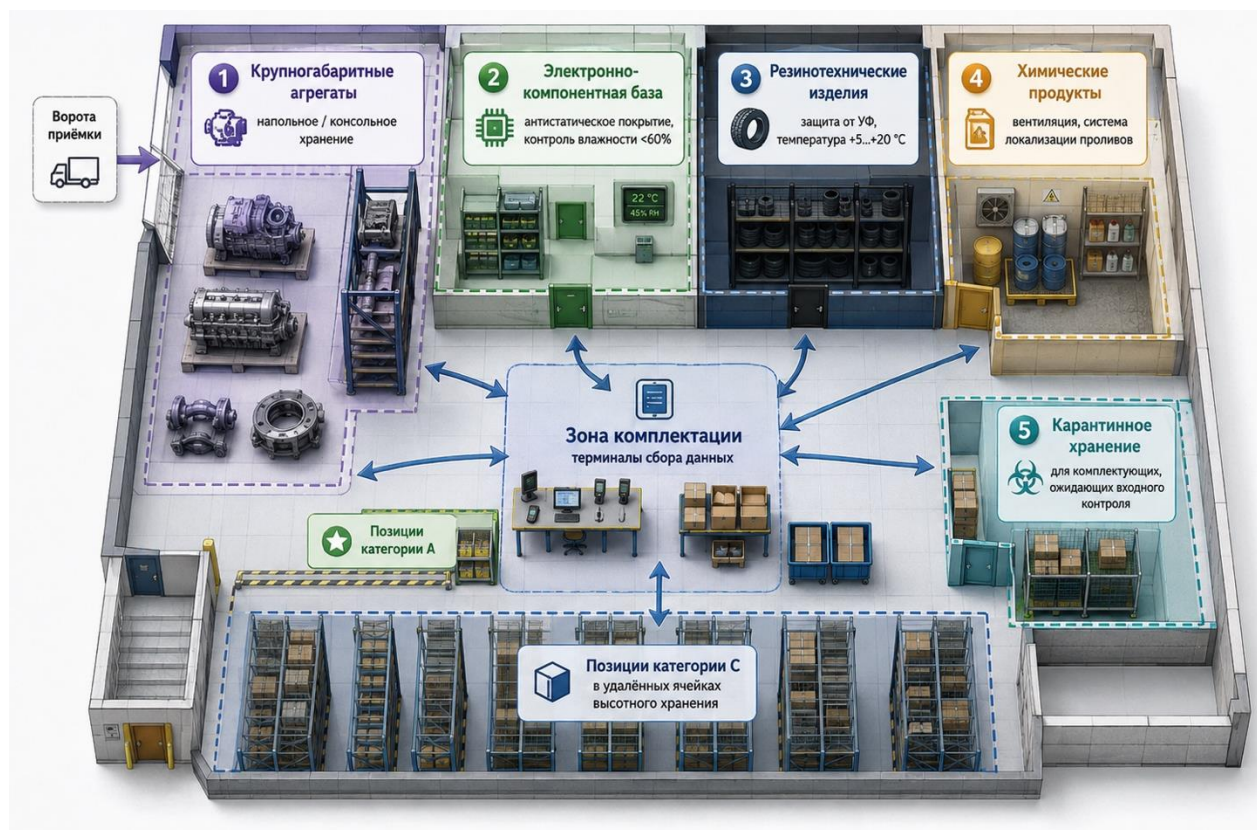


Рисунок 5.7 - Схема зонирования складского пространства запасных частей специальной автомобильной техники

Практика аэропортов МАУ показывает, что оптимальная схема зонирования предполагает выделение не менее пяти функциональных зон: зона

крупногабаритных агрегатов с напольным или консольным хранением, зона электронно-компонентной базы с антистатическим покрытием и контролем влажности, зона резинотехнических изделий с защитой от ультрафиолетового излучения и поддержанием температуры в диапазоне плюс пять - плюс двадцать градусов по Цельсию, зона химических продуктов с вентиляцией и системой локализации проливов, зона карантинного хранения для комплектующих, ожидающих результатов входного контроля или лабораторных испытаний. Размещение зон определяется не только требованиями к условиям хранения, но и частотой обращения: позиции категории А, по которым отбор производится ежедневно, размещаются в непосредственной близости от зоны комплектации, тогда как позиции категории С и страховой запас по позициям категории В могут располагаться в удалённых ячейках высотного хранения.

Адресная система хранения, реализуемая в современных WMS-платформах, присваивает каждой ячейке уникальный идентификатор, кодирующий тип зоны, номер стеллажа, ярус и позицию. Это позволяет не только оптимизировать маршруты комплектовщиков, но и автоматически формировать задания на перемещение при изменении структуры спроса. Для аэропортов с высокой интенсивностью эксплуатации САТ, к которым относятся все три аэропорта МАУ, существенным фактором является учёт габаритно-весовых характеристик при размещении: тяжёлые агрегаты располагаются на нижних ярусах, лёгкие и редко востребуемые - на верхних. Алгоритмы оптимизации размещения, встроенные в современные WMS, учитывают также принцип совместимости материалов: химически агрессивные вещества не могут храниться в одной зоне с электронными компонентами или резинотехническими изделиями, что требует дополнительного усложнения логики размещения.

Климатические требования к хранению отдельных категорий комплектующих заслуживают отдельного рассмотрения, поскольку их нарушение приводит к необратимой деградации свойств и, как следствие, к преждевременным отказам уже на стадии эксплуатации. Электронные блоки управления, чувствительные к влажности свыше 60 процентов, требуют размещения в

герметичных контейнерах с силикагелевыми адсорбентами или в шкафах с активным контролем микроклимата. Резинотехнические изделия - уплотнительные кольца, манжеты, шланги - подвержены окислительной деградации и потере эластичности при хранении в условиях повышенных температур и воздействия озона; для них регламентируется температура не выше плюс двадцати пяти градусов и относительная влажность 50–70 процентов, причём срок хранения без потери свойств ограничен тремя - пятью годами в зависимости от материала. Гидравлические жидкости типов Skydrol и equivalents требуют защиты от попадания влаги и контроля температуры во избежание расслоения и изменения вязкости.

Системы мониторинга микроклимата, интегрированные с WMS, позволяют в режиме реального времени отслеживать отклонения параметров от заданных диапазонов и формировать алерты для ответственных лиц. В аэропорту Шереметьево, где такая система внедрена в 2022 году, зафиксировано снижение доли комплектующих, выведенных из эксплуатации по причине деградации при хранении, на 40 процентов по сравнению с периодом до внедрения. Цифровые термометры и гигрометры, размещённые в критических зонах, передают данные в систему с интервалом не реже пятнадцати минут, что позволяет выявлять не только системные отклонения (неисправность климатического оборудования), но и локальные - например, нарушение герметичности контейнеров при частых операциях отбора.

Процедура входного контроля качества, завершающая этап логистики и открывающая этап складского хранения, представляет собой многооперационный процесс, качество выполнения которого напрямую определяет надёжность всей последующей цепочки. Для стандартных комплектующих достаточно визуального осмотра и сверки с сопроводительной документацией, однако для узлов, влияющих на безопасность полётов (гидравлические агрегаты рулевого управления, элементы тормозных систем, электронные блоки управления двигателем), требуется проведение расширенных испытаний - герметичности, электрических параметров, функциональных тестов на специализированных стендах. Практика Домодедово

показывает, что доля комплектующих, не прошедших входной контроль, составляет в среднем 1,5–3 процента от общего объёма поставок, причём значительная часть выявленных дефектов - скрытые, не обнаруживаемые при визуальном осмотре, что подтверждает необходимость инструментального контроля для критических позиций.

Системы автоматической идентификации - штрихкодирование и радиочастотная идентификация (RFID) - выступают технологическим фундаментом современного складского учёта. Штрихкодовые метки, наносимые на каждую единицу хранения при приёмке, позволяют фиксировать все операции перемещения через терминалы сбора данных, исключая ручной ввод и связанные с ним ошибки. RFID-метки, применяемые для наиболее критичных и дорогостоящих позиций, обеспечивают бесконтактное считывание информации и позволяют проводить инвентаризацию без извлечения единиц хранения из ячеек. В аэропорту Внуково, где RFID-технологии внедрены с 2023 года для позиций категории А, время проведения плановой инвентаризации сократилось с трёх суток до восьми часов при одновременном повышении точности учёта с 92 до 99,5 процентов.

Каждая единица хранения в системе формирует собственный цифровой паспорт, аккумулирующий исчерпывающую информацию о происхождении комплектующей: дата поступления на склад, идентификатор поставщика, номер производственной партии, срок годности, результаты входного контроля, история перемещений по ячейкам, факты отбора и возврата. Эта информация служит не только для операционного учёта, но и для аналитических целей: анализ сроков пребывания позиций на складе позволяет выявлять медленно оборачивающиеся запасы и принимать решения об их перераспределении или утилизации, а данные о сроках годности - формировать превентивные заявки на замену комплектующих, приближающихся к предельному сроку хранения.

Процедура инвентаризации, являющаяся обязательным элементом складского учёта, в описываемой системе приобретает характер не разового мероприятия, а непрерывного процесса циклического аудита. Скользящая инвентаризация, при которой ежедневно проверяется определённое подмножество

позиций (как правило, категории А - ежедневно, категории В - еженедельно, категории С - ежемесячно), позволяет выявлять расхождения на ранней стадии и локализовать их причины. Расхождения могут быть обусловлены как техническими факторами (ошибки при приёме или отборе, некорректная работа RFID-считывателей), так и организационными (несанкционированный отбор, нарушения процедур перемещения). Глубокий анализ причин расхождений, проводимый по методологии Root Cause Analysis, формирует основу для корректирующих мероприятий и позволяет снижать уровень расхождений в динамике.

Переход к внутреннему распределению - то есть к процессу удовлетворения запросов ремонтных служб на конкретные комплектующие - осуществляется через систему заявок, интегрированную с WMS-платформой. Заявка, формируемая ремонтной бригадой или диспетчерской службой, содержит унифицированное наименование позиции, каталожный артикул, количество, идентификатор техники, на которой будут проводиться работы, и приоритет выполнения. Приоритет определяется по матрице критичности, аналогичной той, что используется при ранжировании заявок на ремонт: позиции, необходимые для устранения неисправностей, влияющих на безопасность полётов, обрабатываются вне очереди, тогда как заявки на плановые замены могут быть отложены до момента оптимальной загрузки комплектовщиков.

Процесс комплектации заказа в системе WMS оптимизируется алгоритмом, учитывающим расположение ячеек, приоритеты заявок и текущую загрузку персонала. Терминал сбора данных выдаёт комплектовщику последовательность операций, минимизирующую общий путь перемещения по складу, что в условиях крупных складских комплексов аэропортов (площадью от 500 до 2000 квадратных метров) даёт существенный выигрыш по времени. Перед выдачей каждой позиции проводится дополнительная верификация соответствия каталожного номера и визуального состояния, что исключает риск выдачи некондиционной или несовместимой комплектующей. Применение RFID-ворот на выходе из зоны хранения позволяет автоматически фиксировать факт отбора и обновлять учётные данные без участия человека.

Доставка комплектующих от склада до места проведения ремонтных работ осуществляется силами внутренней логистической службы аэропорта с использованием специализированных транспортных средств - электрокар, погрузчиков, автомобилей повышенной проходимости для перронных работ. Маршрутизация внутриплощадочного перемещения строго синхронизирована с регламентами безопасности аэродромного комплекса: движение по перрону осуществляется по утверждённым схемам, с соблюдением скоростных ограничений и требований к световой сигнализации. Для заявок, влияющих на безопасность полётов, применяется процедура экспресс-доставки с приоритетным проездом по согласованию с диспетчерской службой.

Документальное сопровождение процесса внутреннего распределения включает несколько уровней. При выдаче комплектующей со склада формируется расходный ордер, фиксирующий идентификатор позиции, количество, дату и получателя. При установке детали на технику ремонтная бригада заполняет форму подтверждения использования, в которой указываются серийный номер установленной детали, идентификатор техники, дата установки, ответственный исполнитель. Этот документ служит основанием для бухгалтерского списания материалов и одновременно - для актуализации данных в системе управления техническим обслуживанием (EAM/CMMS). Прослеживаемость (traceability) каждой единицы хранения от момента поступления на склад до момента установки на технику обеспечивает возможность ретроспективного анализа в случае возникновения повторных отказов и формирования претензионной работы с поставщиком в случае выявления скрытых дефектов.

Отдельного рассмотрения заслуживает процедура обратного логистического потока (reverse logistics), охватывающая возврат невостребованных комплектующих, передачу на регенерацию дефектных узлов и организацию утилизации отработанных позиций. Возврат невостребованных деталей на склад происходит в случаях отмены или изменения плана ремонта, причём такие позиции подлежат повторному входному контролю для подтверждения сохранения свойств. Дефектные узлы, подлежащие регенерации, передаются на специализированные

предприятия по договорам оказания услуг, с оформлением актов дефектации и последующим возвратом восстановленных позиций на склад. Отработанные комплектующие, не подлежащие восстановлению, утилизируются в соответствии с экологическими требованиями, причём для отдельных категорий (аккумуляторные батареи, отработанные масла, резинотехнические изделия) действуют специальные регламенты, требующие передачи лицензированным подрядчикам.

Система ключевых показателей эффективности складского хозяйства и внутреннего распределения включает следующие индикаторы: точность учётных данных (доля расхождений при инвентаризации), средний срок выполнения заявки от момента поступления до выдачи комплектующей, доля заявок, выполненных с первого раза без повторных обращений, средний срок пребывания позиций на складе (оборачиваемость), доля комплектующих, выведенных из эксплуатации по причине деградации при хранении, стоимость содержания складского запаса в процентах от его средней стоимости. Мониторинг этих показателей в режиме реального времени через дашборды WMS позволяет выявлять проблемные области и инициировать корректирующие мероприятия.

Связь складского хозяйства с прогностическим контуром, описанным в подразделе 5.4.1, реализуется через двусторонний обмен данными. С одной стороны, результаты имитационного моделирования определяют структуру страхового запаса и точки перезаказа для каждой позиции, что автоматически отражается в заданиях WMS на пополнение. С другой стороны, данные о фактическом расходе, сроках пребывания на складе, случаях деградации свойств возвращаются в модель и используются для уточнения параметров распределений и поправочных коэффициентов. Такая замкнутая архитектура обеспечивает непрерывную адаптацию системы к изменяющимся условиям эксплуатации.

Цифровая трансформация складских процессов в аэропортах МАУ находится на разных стадиях. Шереметьево, с наиболее развитой ИТ-инфраструктурой, близок к реализации концепции «цифрового двойника» склада, при которой все операции моделируются в виртуальной среде до физического выполнения, что позволяет оптимизировать загрузку персонала и маршруты перемещения.

Домодедово внедряет элементы предиктивной аналитики для прогнозирования потребности в комплектующих на основании телеметрических данных с техники. Внуково находится в начале пути цифровой трансформации, однако даже базовые мероприятия - внедрение штрихкодирования и WMS - дают существенный эффект по повышению точности учёта и сокращению времени обработки заявок.

Завершая описание этапа складского хранения и внутреннего распределения, следует подчеркнуть его системообразующую роль в общей архитектуре комплексного обеспечения специальной автомобильной техники. Именно на этом этапе абстрактные результаты математического моделирования обретают физическое воплощение в виде конкретных комплектующих, готовых к установке на технику. Качество организации этого этапа - точность учёта, соблюдение условий хранения, оперативность отклика на запросы - напрямую определяет коэффициент технической готовности парка и, в конечном счёте, бесперебойность функционирования аэропортовой инфраструктуры. Разработанная в настоящей работе методика, опирающаяся на имитационное моделирование и интегрированная с современными информационными системами управления складом, позволяет существенно повысить обоснованность управленческих решений на этом этапе и снизить совокупные издержки на материально-техническое обеспечение.

Переход от этапа складского хранения к этапу технического обслуживания и ремонта, рассматриваемому в следующем подразделе, осуществляется через процедуру выдачи комплектующих ремонтной бригаде и документального оформления факта их передачи. Связь между этими этапами обеспечивается через систему заявок на ремонт, которая, как будет показано далее, является триггером для запуска всего цикла восстановительных работ.

5.4.4 Процесс технического обслуживания и ремонта

Переход от этапа складского хранения и внутреннего распределения к этапу непосредственного технического обслуживания и ремонта (ТОиР) знаменует собой, по существу, точку, в которой материальные ресурсы, аккумулированные на

предыдущих стадиях, начинают преобразовываться в эксплуатационную готовность специальной автомобильной техники. Если прогностический контур, контур закупок и складской контур отвечали за создание предпосылок для бесперебойной работы парка, то контур ТОиР реализует эту работу физически - через восстановление работоспособности конкретных узлов и агрегатов. При этом в архитектуре системы, разрабатываемой в настоящей работе, процесс ТОиР не является изолированным производственным циклом - он жёстко увязан как с предшествующими этапами (через систему заявок на комплектующие, формируемую на основании данных имитационной модели), так и с последующим аналитическим контуром (через передачу данных о фактических отказах, трудозатратах и характере повреждений для уточнения прогностических моделей).

Нормативная база организации технического обслуживания и ремонта специальной автомобильной техники в аэропортах формируется совокупностью документов федерального и корпоративного уровней. На федеральном уровне это Федеральные авиационные правила «Требования к обеспечению аэродромов средствами наземного обслуживания воздушных судов», утверждённые приказом Минтранса России, а также отраслевые руководства по технической эксплуатации конкретных типов машин. На корпоративном уровне - внутренние регламенты аэропортов, определяющие структуру службы главного инженера, порядок взаимодействия между диспетчерской службой, ремонтными бригадами и складом, формы первичной учётной документации. В аэропортах МАУ эти регламенты имеют существенные различия: в Шереметьево с 2021 года действует единая цифровая система управления ремонтами на базе CMMS-платформы, интегрированной с телематическими шлюзами, собирающими данные с бортовых диагностических систем техники; в Домодедово внедрена гибридная система, сочетающая элементы собственной ERP-платформы и модулей российского производства «1С:ТОИР»; во Внуково процессы ТОиР в ряде подразделений до сих пор опираются преимущественно на бумажный документооборот с последующим ручным переносом данных в электронные таблицы.

Приём заявок на ремонт и их диспетчеризация представляют собой начальный этап контура ТОиР, от качества организации которого зависит скорость реакции на возникшие неисправности. В соответствии с действующими в аэропортах регламентами, обнаружение неисправности оперативным персоналом - водителем, оператором, механиком - влечёт за собой обязательное уведомление диспетчерской службы через установленные каналы связи (радиосвязь, специализированные программные платформы, терминалы сбора данных). Сообщение должно содержать идентификационные параметры машины, описание симптомов неисправности, условия её возникновения и оценку критичности. Диспетчерская служба, в свою очередь, проводит первичную классификацию заявки по матрице критичности, аналогичной той, что применяется при ранжировании запасных частей: неисправности, влияющие на безопасность полётов или способные привести к срыву технологического графика наземного обслуживания воздушных судов, переводятся в статус приоритетных с немедленным выделением ремонтной бригады; неисправности, не влияющие на текущие операции, формируют очередь плановых ремонтов.

Практика аэропортов МАУ показывает, что среднее время от момента обнаружения неисправности до начала ремонтных воздействий составляет от 20–40 минут для приоритетных заявок до 4–8 часов для плановых, причём значительная часть этого времени приходится не на физические работы, а на организационные процедуры - согласование выделения бригады, проверку наличия комплектующих на складе, оформление нарядов-заказов. Внедрение цифровых систем диспетчеризации, таких как реализованная в Шереметьево, позволяет сократить этот промежуток на 30–40 процентов за счёт автоматизации маршрутизации заявок и исключения ручных согласований.

Этап углублённой диагностики и дефектации, следующий за приёмом заявки, представляет собой, по существу, точку, в которой абстрактное описание симптомов, переданное оперативным персоналом, трансформируется в конкретный перечень восстановительных операций. Для специальной автомобильной техники аэропортов, характеризующейся высокой сложностью агрегатов и разнообразием

конструктивных решений, диагностика включает несколько уровней. Первый уровень - визуальный осмотр, позволяющий локализовать зоны явных механических повреждений, течей, следов перегрева. Второй уровень - инструментальная диагностика с применением методов неразрушающего контроля: виброакустический мониторинг для оценки состояния подшипниковых узлов и зубчатых передач, тепловизионная дефектоскопия для выявления перегретых электрических соединений и участков повышенного трения, ультразвуковой контроль для обнаружения внутренних дефектов сварных швов и поковок, измерение рабочих давлений в гидравлических и пневматических трактах, анализ электрических параметров цепей управления. Третий уровень - компьютерная диагностика электронных систем управления (ЭСУ) через специализированные интерфейсы, позволяющая считать коды неисправностей (DTC), проанализировать телеметрию датчиков в реальном времени, протестировать исполнительные механизмы.

Для парка специальной автомобильной техники аэропортов, значительная часть которого находится в эксплуатации свыше десяти лет и не имеет штатной бортовой диагностики современного уровня, особую роль играет выездная диагностика с применением мобильных диагностических комплексов. Практика Домодедово и Внуково показывает, что до 60 процентов первичных обследований техники, вышедшей из строя непосредственно на перроне или взлётно-посадочной полосе, проводятся именно с использованием таких мобильных комплексов, что позволяет избежать дорогостоящей и длительной буксировки машины в стационарную ремонтную зону.

Результатом этапа диагностики является формирование дефектной ведомости - документа, фиксирующего точный перечень выявленных неисправностей, объём необходимых восстановительных работ, потребность в запасных частях и трудозатраты. Именно на этом этапе происходит критически важная связь контура ТОиР с контуром материально-технического обеспечения: данные из дефектной ведомости сопоставляются с фактическими остатками на складе, и при выявлении дефицита инициируется процедура экстренной закупки либо активация страхового

запаса. Имитационная модель, разработанная в главах 3 и 4, позволяет на этом этапе оценить вероятностные сроки поступления недостающих комплектующих и скорректировать план ремонтных работ с учётом этих сроков, минимизируя простой техники.

Планирование ремонта в описываемой системе выходит за рамки простого составления графика и представляет собой задачу сетевого планирования и управления ресурсами. Декомпозиция технологического процесса на отдельные операции, определение их последовательности и взаимных зависимостей, выявление критического пути - всё это позволяет оптимизировать загрузку ремонтных бригад и производственного оборудования. При формировании календарного графика учитываются стохастические факторы - вероятность выявления дополнительных скрытых дефектов в процессе разборки, вероятность задержек в поступлении комплектующих, квалификационный состав доступных ремонтных бригад. Закладывается буфер времени, рассчитываемый на основании исторических данных о фактической продолжительности аналогичных ремонтов, что позволяет нивелировать влияние неопределённости на директивные сроки.

Синхронизация плановых показателей между диспетчерской службой и ремонтным подразделением осуществляется с учётом текущей загрузки производственных мощностей и операционной обстановки в аэропорту. Для приоритетных ремонтов, влияющих на безопасность полётов, допускается приостановка плановых работ и перераспределение ресурсов; для плановых ремонтов согласуются «окна» простоя техники с производственно-диспетчерской службой аэропорта, чтобы минимизировать влияние на технологический график наземного обслуживания воздушных судов. Практика Шереметьево, где эта синхронизация реализована через интегрированную цифровую платформу, показывает, что доля ремонтов, выполненных с нарушением директивных сроков, не превышает 5–7 процентов, тогда как в аэропортах с менее развитой системой планирования этот показатель достигает 15–20 процентов.

Физическое восстановление агрегатов представляет собой многооперационный технологический цикл, строго регламентированный

ремонтной документацией заводов-изготовителей. Начальной операцией выступает демонтаж неисправных узлов и агрегатов с применением специализированного съёмного инструмента и оснастки, что минимизирует риски вторичных механических повреждений сопряжённых деталей. Изъятые компоненты подлежат обязательной маркировке и структурированному размещению для оптимизации последующих сборочных операций. Далее проводится углублённая дефектация демонтированных элементов: очистка поверхностей от эксплуатационных загрязнений и консервационных составов, визуальный и инструментальный контроль на предмет выявления усталостных микротрещин, коррозионных каверн, сколов и критического износа посадочных мест.

Компоненты, не подлежащие восстановлению, заменяются на новые оригинальные или сертифицированные аналоговые узлы, поступившие со склада в рамках контура материально-технического обеспечения. Детали, обладающие ремонтпригодностью, подвергаются регенерации с применением технологий наплавки, аргонодуговой сварки, прецизионной шлифовки, токарно-фрезерной обработки. В условиях аэропортов МАУ значительная часть таких операций передаётся на аутсорсинг специализированным ремонтным предприятиям, с которыми заключены рамочные договоры; однако критические операции, требующие оперативного выполнения, проводятся силами собственных ремонтных служб. Ключевым критерием является строгое соответствие геометрических и физико-механических параметров восстановленных элементов заводским допускам, что верифицируется через систему входного контроля после возврата деталей с аутсорсинга.

Восстановление электронных блоков управления и сенсорных систем требует применения специализированных постов для микропайки, осциллографической диагностики и перепрошивки микроконтроллеров. Операции выполняются в условиях экранирования с обязательным использованием антистатической защиты для исключения деградации полупроводниковых структур. В условиях санкционных ограничений и затруднённого доступа к оригинальным электронным

компонентам зарубежного производства, практика аэропортов МАУ за 2022–2025 годы свидетельствует о развитии собственных компетенций в области ремонта электронных блоков, а также о формировании пула отечественных подрядчиков, способных выполнять такие работы.

Сборочные операции выполняются в строгой технологической последовательности с использованием динамометрического инструмента для контроля моментов затяжки резьбовых соединений и применением регламентированных герметизирующих материалов. В процессе компоновки осуществляется поэтапная верификация: тестируется герметичность гидравлических и пневматических трактов, измеряется сопротивление изоляции электрических цепей, контролируются кинематические пары. Финальным этапом физического восстановления выступает тонкая настройка и калибровка систем: выверка зазоров, калибровка рабочих давлений в гидросистемах, настройка частот вращения исполнительных механизмов, синхронизация работы датчиков. Эти операции производятся с использованием поверенного метрологического оборудования и завершаются комплексом приемо-сдаточных испытаний.

Приемо-сдаточные испытания представляют собой многоуровневую процедуру, направленную на верификацию работоспособности восстановленного агрегата и соответствие его параметров заводским спецификациям. Первый уровень - стендовые испытания в условиях ремонтной зоны, позволяющие проверить базовые функциональные характеристики. Второй уровень - ходовые испытания на территории аэродрома в условиях, максимально приближенных к реальным эксплуатационным. Третий уровень - приёмка оперативным персоналом, который будет использовать технику в дальнейшей работе, с выполнением типовых технологических операций. Факт успешного прохождения всех уровней испытаний фиксируется подписанием двустороннего акта выполненных работ, который служит основанием для закрытия наряда-заказа, обновления учётных записей в системе управления техническим обслуживанием и ввода техники в эксплуатацию.

Документальное сопровождение процесса ТОиР заслуживает отдельного рассмотрения, поскольку от его качества зависит не только прослеживаемость

выполненных работ, но и достоверность данных, возвращающихся в прогностический контур для уточнения имитационной модели. В состав обязательной документации входят: наряд-заказ с указанием перечня выполненных операций и трудозатрат, дефектная ведомость, акты на установленные запасные части с фиксацией серийных номеров и дат установки, акты приемо-сдаточных испытаний, запись в формуляре и паспорте машины о выполненных работах. В аэропортах с внедрёнными цифровыми системами (Шереметьево, частично Домодедово) эти документы формируются автоматически на основании данных, вводимых ремонтными бригадами через мобильные терминалы, что исключает дублирование информации и снижает риск ошибок.

Особого внимания заслуживает вопрос внесения изменений в техническую документацию, сопровождающую машину. Факты замены узлов, агрегатов, проведения сложных технологических операций, модификаций и дооснащений требуют обязательной актуализации электрических и гидравлических схем, формуляров и паспортов. Поддержание строгой конфигурационной целостности технической документации является необходимым условием для обеспечения прослеживаемости жизненного цикла техники и формирования достоверной информационной базы для последующих ремонтов. Практика показывает, что в аэропортах с бумажным документооборотом актуальность технической документации составляет 70–80 процентов, тогда как в цифровых системах этот показатель достигает 95–98 процентов.

После ввода техники в эксплуатацию реализуется процесс послеремонтного мониторинга, направленный на выявление скрытых дефектов и оценку качества выполненных работ. В современной специальной автомобильной технике аэропортов, оснащённой телематическим оборудованием, такой мониторинг осуществляется непрерывно через анализ бортовых данных: параметров работы двигателя, давления в гидравлических системах, вибрационных характеристик, температурных режимов. При выявлении отклонений от штатных параметров инициируется протокол внепланового вмешательства, включающий углублённую инструментальную диагностику и устранение выявленных несоответствий.

Критическим условием эффективности данного контура является выстраивание оперативной петли обратной связи между линейным эксплуатационным персоналом и инженерно-ремонтными подразделениями, что минимизирует задержки в обнаружении и устранении инцидентов.

Архитектура системы послеремонтного мониторинга опирается на предиктивные алгоритмы, формирующие вероятностные прогнозы повторных отказов на базе многомерного анализа эксплуатационной телеметрии, режимов нагружения агрегатов и исторических массивов ремонтных воздействий. Применение моделей машинного обучения позволяет выявлять нелинейные зависимости и стохастические тренды деградации, обеспечивая превентивную активацию планово-предупредительных работ и оптимизацию сроков замены критических узлов до наступления функционального отказа. Именно на этом этапе данные, накопленные в ходе текущего ремонта, возвращаются в имитационную модель, разработанную в главах 3 и 4, и используются для уточнения параметров распределений наработки до отказа, поправочных коэффициентов, учёта условий эксплуатации.

Кадровое обеспечение процесса ТОиР представляет собой отдельный критический вектор устойчивого функционирования всей системы. Эксплуатация сложной специальной автомобильной техники аэропортов, значительная часть которой имеет зарубежное происхождение и оснащена современными электронными системами управления, требует от ремонтного персонала фундаментальных компетенций в области механики, гидравлики, электроники, компьютерной диагностики. Программа обучения и повышения квалификации, реализуемая в аэропортах МАУ, включает модули, посвящённые специфике конкретных типов машин, методам диагностики, работе с цифровыми системами управления ремонтами, а также статистическому анализу данных об отказах. Систематическое повышение квалификационного уровня эксплуатационного и ремонтного персонала выступает необходимым условием для эффективной реализации описанной методики и снижения частоты повторных отказов.

Система ключевых показателей эффективности контура ТОиР включает следующие индикаторы: средний срок выполнения ремонта от момента поступления заявки до ввода техники в эксплуатацию, доля ремонтов, выполненных с нарушением директивных сроков, доля повторных отказов в течение 30 суток после завершения ремонта, коэффициент технической готовности парка, удельные трудозатраты на единицу наработки техники, стоимость ремонтных воздействий в расчёте на одну машину. Мониторинг этих показателей в режиме реального времени через дашборды CMMS-системы позволяет выявлять проблемные области и инициировать корректирующие мероприятия.

Связь контура ТОиР с имитационной моделью, разработанной в настоящей работе, реализуется через двусторонний обмен данными. С одной стороны, результаты имитационного моделирования определяют прогнозные моменты возникновения потребности в ремонтных воздействиях и запасных частях, что позволяет формировать превентивные планы ремонтов и оптимизировать загрузку ремонтных бригад. С другой стороны, данные о фактических отказах, трудозатратах, характере повреждений, сроках выполнения ремонтов возвращаются в модель и используются для уточнения параметров распределений, поправочных коэффициентов, учёта условий эксплуатации. Такая замкнутая архитектура обеспечивает непрерывную адаптацию системы к изменяющимся условиям эксплуатации.

Завершая описание этапа технического обслуживания и ремонта, следует подчеркнуть его системообразующую роль в общей архитектуре комплексного обеспечения специальной автомобильной техники. Именно на этом этапе абстрактные результаты математического моделирования обретают физическое воплощение в виде восстановленных агрегатов, готовых к дальнейшей эксплуатации. Качество организации этого этапа - точность диагностики, обоснованность планирования, соблюдение технологической дисциплины, эффективность послеремонтного мониторинга - напрямую определяет коэффициент технической готовности парка и, в конечном счёте, бесперебойность функционирования аэропортовой инфраструктуры. Разработанная в настоящей

работе методика, опирающаяся на имитационное моделирование и интегрированная с современными информационными системами управления ремонтами, позволяет существенно повысить обоснованность управленческих решений на этом этапе и снизить совокупные издержки на техническое обслуживание.

Переход от этапа технического обслуживания и ремонта к этапу анализа данных и адаптации системы, рассматриваемому в следующем подразделе 5.4.5, осуществляется через процедуру документального закрытия наряда-заказа и передачи накопленных данных в аналитический контур. Связь между этими этапами обеспечивается через систему ключевых показателей эффективности и механизмы обратной связи, где каждое отклонение факта от прогноза, каждый повторный отказ, каждый случай нарушения директивных сроков становятся основанием для уточнения прогностических моделей и корректировки стратегии материально-технического обеспечения.

5.4.5 Анализ эффективности и адаптация системы

Завершающим, но отнюдь не второстепенным элементом архитектуры комплексной системы обеспечения специальной автомобильной техники запасными частями выступает аналитический контур, замыкающий цикл управления и обеспечивающий непрерывную адаптацию всех предшествующих этапов к изменяющимся условиям эксплуатации. Если подразделы 5.4.1–5.4.4 описывали, по существу, прямую цепочку преобразований - от прогноза потребности до физического восстановления агрегатов, - то настоящий подраздел посвящён обратной связи, без которой система неизбежно деградировала бы до уровня реактивного снабжения, теряя всё преимущество предиктивного подхода, заложенного в разработанной имитационной модели.

Необходимость такого замыкающего контура обусловлена фундаментальным свойством стохастических систем, к которым относится парк специальной автомобильной техники аэропортов: параметры распределений наработки до отказа, поправочные коэффициенты условий эксплуатации, логистические плечи и

стоимостные характеристики поставок не являются статичными величинами, а подвержены непрерывной эволюции под воздействием как внутренних факторов (старение парка, изменение интенсивности эксплуатации, внедрение новых методов ремонта), так и внешних (сезонные колебания пассажиропотока, конъюнктурные изменения на рынке запасных частей, санкционные ограничения, курсовые колебания). В Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года прямо закреплён принцип адаптивности транспортных систем к изменяющимся условиям, что в приложении к подсистеме материально-технического обеспечения САТ аэропортов означает обязательное наличие механизмов непрерывной калибровки прогностических моделей и операционных регламентов.

Первичным источником данных для аналитического контура выступает массив фактов фактического потребления запасных частей, аккумулируемый в системе WMS по мере их выдачи ремонтным бригадам и установки на технику. Каждая транзакция отбора фиксирует не только идентификатор позиции и количество, но и контекст потребления: машину, на которой производилась замена, характер ремонтного воздействия (плановое техническое обслуживание, внеплановый ремонт, аварийное восстановление), фактическую наработку узла на момент замены. Эти данные, передаваемые в аналитический модуль через интеграционный шлюз с CMMS-системой, образуют эмпирическую выборку, сопоставление которой с прогнозными значениями, рассчитанными имитационной моделью, и составляет суть дельта-анализа.

Методология дельта-анализа, реализуемая в разработанном программном обеспечении (глава 4), предполагает расчёт отклонений по нескольким параметрам одновременно: по моменту возникновения потребности (фактическая дата замены versus прогнозируемая дата отказа), по объёму потребления за отчётный период versus прогноз, по структуре номенклатуры versus плановая спецификация. Для каждой позиции вычисляется относительное отклонение, которое затем агрегируется по стратам парка и категориям критичности. Позиции, по которым отклонение превышает установленный порог (как правило, 15–20 процентов для

узлов категории А и 25–30 процентов для узлов категорий В и С), подлежат углублённому анализу с целью идентификации причин расхождения.

Причины расхождений могут быть классифицированы на несколько групп. Первая группа - стохастические флуктуации, обусловленные естественной дисперсией наработки до отказа и не требующие корректировки модели; они нивелируются при достаточно большом объёме выборки за счёт закона больших чисел. Вторая группа - систематические сдвиги, связанные с изменением условий эксплуатации (например, введение нового типа воздушных судов, требующего увеличения интенсивности работы перронных автобусов, или изменение регламентов противообледенительной обработки, влияющее на нагружение гидравлики деайсеров); такие сдвиги требуют пересмотра поправочных коэффициентов в имитационной модели. Третья группа - операционные аномалии, обусловленные нарушениями технологической дисциплины (несвоевременное проведение технического обслуживания, использование неоригинальных комплектующих, неквалифицированный ремонт); эти случаи подлежат отдельному расследованию и, как правило, не должны влиять на параметры прогностической модели, но служат основанием для корректирующих воздействий в организационной плоскости.

Ключевым инструментом верификации адекватности модели после внесения корректировок выступает повторная аппроксимация эмпирических распределений теоретическими законами с применением критериев согласия Пирсона и Колмогорова–Смирнова, методика которой изложена в главе 3. Если после актуализации параметров уровень согласия не снижается ниже заданного порога (обычно 0,05 для уровня значимости), корректировки считаются успешными; в противном случае требуется пересмотр структуры модели - возможно, введение дополнительных факторов или изменение семейства распределений для отдельных страт.

Система ключевых показателей эффективности (KPI), по которым оценивается функционирование всей комплексной системы в целом, формируется на пересечении интересов нескольких служб аэропорта: службы главного инженера

(коэффициент технической готовности парка, доля вынужденных простоев по причине отсутствия запасных частей, доля повторных отказов в течение 30 суток после ремонта), службы материально-технического снабжения (уровень сервиса - доля заказов, выполненных в срок и в полном объёме, средняя стоимость владения складским запасом в процентах от его средней стоимости, доля неликвидных позиций в номенклатуре, средний срок исполнения заказа от момента размещения до поступления на склад), финансовой службы (отклонение фактических затрат на снабжение от плановых, оборачиваемость складского запаса, доля иммобилизованного капитала в неликвидных позициях). Мониторинг этих показателей осуществляется в режиме, близком к реальному времени, через дашборды BI-модуля, интегрированного с ERP-системой аэропорта.

Практика аэропортов МАУ показывает, что внедрение подобной системы KPI-мониторинга даёт существенный эффект уже в первые 12–18 месяцев эксплуатации. В Шереметьево, где интегрированная система управления материально-техническим обеспечением функционирует с 2023 года, зафиксировано снижение доли неликвидных позиций в номенклатуре запасных частей с 18 до 9 процентов, сокращение среднего срока вынужденного простоя техники по причине отсутствия комплектующих с 72 до 28 часов, уменьшение отклонения фактических затрат на снабжение от плановых с 22 до 8 процентов. В Домодедово, где внедрение находится в активной фазе, аналогичные показатели демонстрируют тенденцию к улучшению, хотя и с меньшими абсолютными значениями, что объясняется различиями в исходном уровне цифровизации.

Сезонный фактор, уже упоминавшийся в подразделе 5.4.1 в контексте прогнозирования, в аналитическом контуре приобретает самостоятельное значение. Сравнение фактического потребления в зимний и летний периоды с соответствующими прогнозными значениями позволяет уточнить сезонные коэффициенты для каждой страты парка и каждой категории узлов. Для машин противообледенительной обработки и снегоуборочной техники, концентрирующих до 80 процентов годовой наработки в период с ноября по март, такие уточнения критически важны: ошибка в сезонном коэффициенте даже на 10 процентов может

привести либо к дефициту критических позиций в пиковый период, либо к затовариванию склада в межсезонье. Имитационная модель, работающая в режиме скользящего планирования с горизонтом пересмотра один квартал, позволяет оперативно вносить такие корректировки.

Отдельным направлением адаптации выступает реакция на структурные изменения парка - ввод в эксплуатацию новых типов специальной автомобильной техники или вывод из эксплуатации единиц, выработавших назначенный ресурс. Для новых машин, особенно первых партий, статистическая выборка отказов формируется медленно, и прогностическая модель вынуждена опираться либо на паспортные данные завода-изготовителя (которые, как показано в подразделе 5.4.1, систематически завышают фактический ресурс в условиях аэропортов МАУ), либо на экспертные оценки, либо на данные по аналогичным узлам, уже эксплуатирующимся на других типах техники. По мере накопления собственной статистики (как правило, в течение 18–24 месяцев) параметры распределений уточняются, и прогноз становится всё более точным. Для выводимых из эксплуатации машин, напротив, требуется расчёт объёма «последней закупки» критически важных комплектующих, балансирующий между риском дефицита в поздние периоды эксплуатации и затратами на иммобилизацию капитала; эта задача также решается средствами имитационной модели.

Санкционные ограничения, наложенные на Российскую Федерацию в 2022 году и сохраняющиеся по настоящее время, создали дополнительный контур адаптации, не имевший прецедентов в предшествующей практике. Разрыв прямых контрактов с заводами-изготовителями специальной автомобильной техники зарубежного производства, затруднения с поставками оригинальных комплектующих, волатильность цен на рынке параллельного импорта - всё это потребовало существенной перестройки как контура закупок (подраздел 5.4.2), так и аналитического контура. В частности, имитационная модель была дополнена модулем оценки вероятностных сроков поставки с учётом стохастической природы логистических плеч через третьи страны, а также модулем расчёта экономической эффективности перехода на китайские аналоги и регенерации собственных узлов.

Результаты такого расчёта для парка перронных автобусов одного из аэропортов МАУ показали, что при разумном сочетании трёх моделей снабжения (параллельный импорт для узлов категории А, китайские аналоги для узлов категории В, собственная регенерация для узлов категории С) совокупные издержки на материально-техническое обеспечение могут быть снижены на 15–20 процентов по сравнению с реактивной моделью, при этом коэффициент технической готовности парка сохраняется на уровне не ниже 0,92.

Роль машинного обучения в аналитическом контуре постепенно возрастает. Если на начальных этапах внедрения системы корректировка параметров модели осуществлялась преимущественно экспертным путём, то по мере накопления массивов данных (как правило, после 2–3 лет эксплуатации системы) становится возможным применение алгоритмов автоматической калибровки, способных выявлять нелинейные зависимости и скрытые корреляции, неочевидные для эксперта. В частности, нейросетевые модели, обученные на исторических данных об отказах и условиях эксплуатации, позволяют формировать превентивные прогнозы деградации узлов с точностью, существенно превышающей классические статистические методы. Однако следует подчеркнуть, что такие модели не заменяют, а дополняют имитационную модель, разработанную в главах 3 и 4, выступая в качестве надстройки, уточняющей её параметры на основе актуальных данных.

Совокупность рассмотренных механизмов образует единый замкнутый аналитический контур, обеспечивающий преобразование фактических эксплуатационных данных в корректирующие управленческие воздействия. В его рамках информация из систем складского учёта, технического обслуживания, телеметрии и корпоративного планирования последовательно проходит этапы аналитической обработки, после чего результаты возвращаются в контуры прогнозирования, закупок, складского управления и ТОиР. Обобщённая структура аналитического контура и основные направления обратной связи представлены на рисунке 5.8.

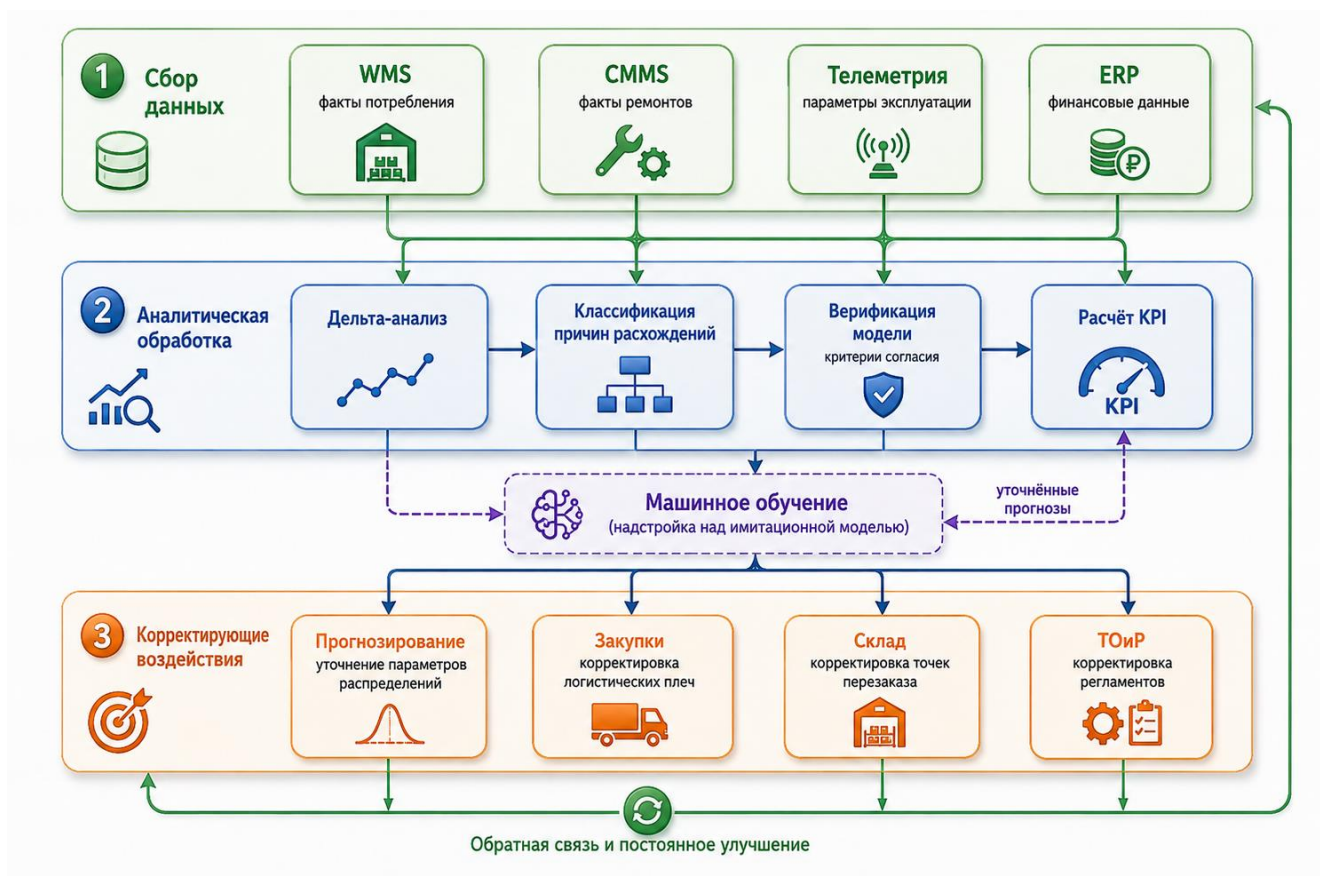


Рисунок 5.8 - Блок-схема аналитического контура с механизмами обратной СВЯЗИ

Цифровая трансформация аналитического контура базируется на интеграции нескольких информационных систем: WMS (складской учёт), CMMS/EAM (управление техническим обслуживанием), ERP (корпоративное планирование ресурсов), SCM (управление цепями поставок), BI (бизнес-аналитика). Сквозная прослеживаемость (traceability) каждой запасной части - от момента размещения заказа у поставщика до момента её установки на технику и последующего анализа фактической наработки - обеспечивает формирование единого информационного пространства, в котором каждое управленческое решение может быть верифицировано и обосновано. Практика Шереметьево показывает, что уровень интеграции этих систем достигает 85 процентов для позиций категории В и С и около 70 процентов для позиций категории А, где сохраняется необходимость экспертной оценки и ручного согласования отдельных решений.

Важным элементом адаптации выступает регулярный пересмотр самой структуры прогностической модели. По мере накопления опыта эксплуатации и появления новых типов специальной автомобильной техники, новых методов диагностики, новых материалов и технологий ремонта, исходные допущения модели могут устаревать и требовать пересмотра. Как правило, такая ревизия проводится не реже одного раза в три года, однако при существенных изменениях внешней среды (как это произошло в 2022 году) может быть инициирована внеплановая ревизия. Результаты ревизии фиксируются в виде обновлённой версии методологии, которая проходит процедуру верификации на исторических данных перед внедрением в промышленную эксплуатацию.

Кадровое обеспечение аналитического контура заслуживает отдельного рассмотрения. Эффективное функционирование описанной системы невозможно без наличия инженерно-аналитического персонала, обладающего одновременно компетенциями в области теории надёжности, математической статистики, имитационного моделирования и специфики эксплуатации специальной автомобильной техники аэропортов. Подготовка таких специалистов в России до сих пор ведётся фрагментарно, и аэропорты МАУ вынуждены решать эту задачу либо через внутреннее обучение с привлечением профильных вузов (в частности, МАДИ, где разработанная методика используется в учебном процессе), либо через привлечение внешних консультантов. Программа обучения, реализуемая в Шереметьево и Домодедово, включает модули по работе с имитационной моделью, по методам статистического анализа данных об отказах, по взаимодействию с цифровыми системами управления, а также по пониманию физики деградации узлов специальной автомобильной техники.

Завершая описание аналитического контура и, соответственно, всего раздела 5.4 в целом, следует вернуться к исходной установке, сформулированной в преамбуле: комплексная система обеспечения специальной автомобильной техники запасными частями представляет собой замкнутый киберфизический контур управления, в котором каждый этап - прогнозирование, закупки, складирование, ремонт, анализ - не существует изолированно, а жёстко связан с остальными

этапами двусторонними информационными и материальными потоками. Разработанная в настоящей работе методология, опирающаяся на имитационное моделирование наработки узлов и агрегатов (главы 3–4) и интегрированная с современными информационными системами управления, обеспечивает именно такую замкнутость, превращая систему из набора разрозненных процедур в единый организм, способный к самообучению и адаптации.

Количественная оценка эффективности такой системы, приведённая в подразделе 5.1, показывает снижение совокупных издержек на материально-техническое обеспечение парка специальной автомобильной техники на 20–25 процентов по сравнению с традиционной реактивной моделью, при одновременном повышении коэффициента технической готовности парка с 0,85–0,88 до 0,92–0,95. Эти цифры, подтверждённые апробацией на статистических данных реальных эксплуатационных предприятий (Шереметьево, Домодедово, Внуково), свидетельствуют о том, что переход к предиктивной модели снабжения, основанной на имитационном моделировании, не просто улучшает отдельные показатели, а качественно меняет саму парадигму управления парком специальной автомобильной техники аэропортов.

В условиях продолжающейся структурной перестройки рынка запасных частей, обусловленной санкционными ограничениями и необходимостью импортозамещения, такая парадигма приобретает особое значение. Она позволяет аэропортам не просто реагировать на возникающие вызовы, но и упреждающе формировать стратегию материально-технического обеспечения, основанную на количественных оценках рисков и экономических эффектов. Именно это, в конечном счёте, и составляет практическую значимость настоящей диссертационной работы, результаты которой, как показано в предыдущих главах, нашли применение не только в аэропортах Московского авиационного узла, но и в проектных организациях отрасли, а также в учебном процессе профильных вузов.

Выводы по пятой главе

1. Описана эффективность политики моделирования принятия решений в бизнес-процессах компаний. Подчеркнута важность планирования и учёта неопределённых составляющих в технических процессах. Предложена методика моделирования технических процессов для использования в принятии решений в бизнес-процессах. Описаны эффекты от внедрения таких моделей. Ключевыми эффектами являются снижение затрат на ремонт и техническое обслуживание, повышение эффективности эксплуатации специальной автомобильной техники, снижение рисков и повышение безопасности, дополнительные экономические выгоды.

2. Проведён расчёт прикладного использования разработанной модели наработки узлов и агрегатов специальной автомобильной техники для предупреждения отказов и планирования ремонта. Было проведено сравнение разработанной методики с двумя иными стратегиями снабжения запасными частями аэропортов МАУ. Оказалось, 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. Сущность потерь простоя специальной автомобильной техники в ожидании ремонта приводит к возможности пессимистичного использования результатов моделирования, где за рекомендуемый момент поставки запасных частей стоит принимать худший вариант развития событий моделирования, так как просто запасных частей в ожидании потребности намного менее убыточен простоя специальной автомобильной техники в ожидании ремонта.

3. Описаны требования к интеграции системы моделирования наработки узлов и агрегатов специальной автомобильной техники для предупреждения отказов и планирования ремонта. 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, характеристики поставщиков, качества приобретаемых деталей, управление ресурсами склада и т.п. или интеграция алгоритма в уже существующие системы управления поставками, техническим состоянием автопарка специальной автомобильной техники и т.д. Модельными расчетами 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.

4. Отмечена важность постоянных корректировок в состав исходных данных системы в зависимости от внешних и внутренних условий эксплуатации специальной автомобильной техники на каждом отдельном предприятии. На основе стабильного потока данных возможно развитие модели для выполнения конкретных требований в условиях эксплуатации. Высокое качество предоставляемых исходных данных обеспечивает более точный прогноз, а стандартизация номенклатуры запасных частей гарантирует стабильность работы алгоритма на протяжении большего срока моделирования.

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 выполнить 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 потребных для своевременного ремонта компонентов узлов и агрегатов специальной автомобильной техники в аэропортах МАУ. Исследование можно характеризовать, как имеющее важное хозяйственное значение для развития специального автомобильного транспорта 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»:

– п.2. «Оптимизация планирования, организации и управления перевозками пассажиров и грузов, технического обслуживания, ремонта и сервиса автомобилей, использования программно-целевых и логистических принципов»;

– п.16. «Развитие инфраструктуры перевозочного процесса, обеспечение ее физической, информационной и социально-экономической доступности, технической эксплуатации и сервиса»;

– п.17. «Развитие информационных технологий в сфере перевозок, технической эксплуатации и сервиса».

Основные результаты и выводы.

В результате выполненных теоретико-методологических исследований, разработанных математических моделей, проведённых экспериментальных исследований и организационных мероприятий, направленных на повышение эффективности функционирования системы снабжения запасными частями автопарков специальной автомобильной техники в аэропортах – сформирована научная методология и разработаны практические методы, обеспечивающие получение оптимальных решений и сокращающие 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 конечном итоге в развитие экономики страны и повышение качества процессов транспортного обслуживания в Российской Федерации, что подтверждает народнохозяйственную 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 [206]. Показано, что в структуре парка наземной техники аэропортов МАУ соотношение

техники иностранного производства к отечественной составляет 85% на 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 разработана комплексная методология 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 на основе 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 графическом представлении в виде графика частот отказов на определённые сроки эксплуатации. Разработанное программное обеспечение автоматизирует 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, характеристики 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 решена важная народно-хозяйственная задача – снижения затрат на ремонт и ТО, повышение надежности техники, повышение качества планирования работ и обеспечение безопасности эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белый О.В. Архитектура и методология транспортных систем / О.В. Белый, О.Г. Кокаев, С. А. Попов. – СПб.: Элмор, 2002. – 256 с.
2. Арифуллин И. В. Создание интегрированной транспортно-логистической системы Новой Москвы путем внедрения комплексных транспортных узлов //Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2013. – №. 9. – С. 64-66.
3. Бережная Е.В. Математические методы моделирования экономических систем: учеб. Пособие / Е.В. Бережная, В.И. Бережной. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 432 с.
4. Самуленков Ю. И., Бабков А. Б., Филатова Я. А. Совершенствование инфраструктуры аэропортов гражданской авиации с учетом проектирования организаций по техническому обслуживанию воздушных судов //Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2022. – Т. 25. – №. 1. – С. 35-52.
5. Железная И. П. Стратегия развития наземной инфраструктуры аэропортов гражданской авиации //Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2014. – №. 202. – С. 21-24.
6. Дудкин Е. П., Дороничева С. А. Специальный транспорт. – 2018.
7. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 395 с.
8. Митягин Г. Е., Пуляев Н. Н., Лукьянов В. Б. Оптимизация необходимого числа автомобилей технического обслуживания //Международный научный журнал. – 2007. – №. 4. – С. 38-41.
9. Бутов А.С. Транспортные системы. Моделирование и управление / А. С. Бутов и др.; под ред. А. С. Бутова. – СПб.: Судостроение, 2001. – 552 с.
10. Грешилов А.А., Стакун В.А., Стакун Л.А. Математические методы построения прогнозов. – М.: Радио и связь, 1997. – 112с.

11. Котиков Ю. Г. Основы системного анализа транспортных систем: учеб. Пособие / Ю. Г. Котиков. – СПб.: СПбГАСУ, 2001. – 264 с.
12. Арифуллин И. В., Некрасов В. В., Соловьева А. А. Интегрированная логистическая поддержка поставок запасных частей для аэродромной наземной техники (на примере пожарных машин аэропортов Московского авиационного узла) //Автотранспортное предприятие. – 2013. – №. 7. – С. 54-55.
13. Арифуллин И. В., Терентьев А. В. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НА УРОВНЕ РЕГИОНА ОБЕСПЕЧЕНИЕМ АВТОМОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ АЭРОПОРТОВ ЗАПАСНЫМИ ЧАСТЯМИ //Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2018. – №. 5. – С. 46-49.
14. Колмогоров А. Н. Основные понятия теории вероятностей. 2 изд. – М.: наука, 1950.
15. Булычев В. А. Теория вероятностей и математическая статистика. – 1979.
16. Джордж М. Бережливое производство + шесть сигм в сфере услуг. – 2005.
17. Андерсен Б. Бизнес процессы – инструменты совершенствования. – 2003.
18. Атапин В. Г. Основы теории надежности: учебное пособие //Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2017. Семенов В. А. Теория вероятностей и математическая статистика. – 2012.
19. Острейковский В. А. Теория надежности. Учебник. – 2012.
20. Арифуллин И. В., Терентьев А. В. Анализ природы факторов влияния внешней среды на сроки эксплуатации автомобилей //Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2019. – №. 1. – С. 47-50.
21. Ершов В. В. Основы теории надежности. – 1993.
22. ГЛАГОЛЕВ С. Н., ГОЛОВИН С. И., СЕВРЮГИНА Н. С. Теория оценки экономической устойчивости предприятий сервиса автомобильного транспорта //Мир транспорта и технологических машин. – 2011. – №. 4. – С. 105-108.

23. Каштанов В., Медведев А. Теория надежности сложных систем. – Litres, 2022.
24. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ. – 1965.
25. Севрюгина Н. С., Прохорова Е. В., Дикевич А. В. Моделирование нештатных ситуаций при оценке надежности спецтехники //Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2012. – №. 57. – С. 90-96.
26. Федухин А. В., Пасько В. П. Моделирование надежности систем //Методы менеджмента качества. – 2012. – №. 3. – С. 50-55.
27. Баженов Ю. В., Баженов М. Ю. Основы теории надежности машин //учеб. Пособие/ЮВ Баженов.–Владимир.: Изд-во Владим. Гос. Ун-та. – 2006.
28. Сычёв В. П. Специальный подвижной состав. – 2015.
29. Крамаренко Г. В. Техническое обслуживание автомобилей. – 1968.
30. Громов Ю. Ю. и др. Надёжность информационных систем. – 2015.
31. ГЛАЗКОВ Ю. Е., ПРОХОРОВ А. В., ХРЕННИКОВ А. О. Техническое обслуживание и ремонт автомобилей. – 2003.
32. Пучин Е. А. и др. Технология ремонта машин. – 2007.
33. Лебедев А. Т. И др. Ремонт машин. – 2015.
34. Карагодин В. И. Ремонт автомобилей. – 2021.
35. Беднарский В. В. Техническое обслуживание и ремонт автомобилей. – 2007.
36. Воронина И. Ф. и др. Прогнозирование расходов запасных частей на автосервисных предприятиях с использованием корреляционно-регрессионного анализа //Вести Автомобильно-дорожного института. – 2019. – №. 2. – С. 27-34.
37. Схиртладзе А. Г., Скрыбин В. А., Борискин В. П. Ремонт технологических машин и оборудования. – 2014.

38. Блянкинштейн И. М. Оценка конкурентоспособности технологического оборудования для технического обслуживания и ремонта автомобилей. – 2010.
39. Коваленко Н. А. Организация технического обслуживания и ремонта автомобилей. – 2016.
40. Митягин Г. Е., Пуляев Н. Н., Лукьянов В. Б. Оптимизация необходимого числа автомобилей технического обслуживания //Международный научный журнал. – 2007. – №. 4. – С. 38-41.
41. Гуменюк С.В. Современное техническое обслуживание автомобиля // Достижения вузовской науки. – 2015. - №4. – С. 120-125.
42. Ясенков Е.П. Актуальность проблемы повышения эффективности технической эксплуатации автомобилей // Вестник машиностроения. – 2006. - №7. – С. 45-50.
43. Лянденбургский В.В., Рыбакова Л.А., Судьев В.В. Анализ снижения трудоемкости динамичной системы технического обслуживания автомобилей // Механизация и автоматизация производства. – 2014. - №3. – С. 67-72.
44. Рыжкин А. А., Слюсарь Б. Н., Шучев К. Г. Основы теории надежности //Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ. – 2002.
45. Тимошенков С. П., Симонов Б. М., Горошко В. Н. Основы теории надежности. – 2015.
46. Сапожников В. В., Сапожников В. В., Ефанов Д. В. Основы теории надежности и технической диагностики. – 2019.
47. Рыбин Н. Н., Жаров С. П., Осипов Г. В. Техническая эксплуатация автомобилей. – 2009.
48. Диллон Б С. Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем (репринт 1981). – мир, 1984.
49. Карпова Н. П. Стратегическое планирование снабжения организаций на логистических принципах (теория и методология) //Самарский государственный экономический университет. Самара. – 2011.

50. Шарыпов А. В., Осипов Г. В. Основы теории надежности транспортных систем. – 2006.
51. Королёв В. Ю., Бенинг В. Е., Шоргин С. Я. Математические основы теории риска. – 2010.
52. Пирогов К. М., Егоров С. А. Основы надежности текстильных машин. – 2004.
53. Боголюбов Н.А. Техническое обслуживание и ремонт автомобилей. – М.: Академия, 2019. – 320 с.
54. Зубарев Ю. М. Основы надежности машин и сложных систем. – 2017.
55. Арифуллин И. В., Терентьев А. В., Егунова Т. Н. Дискретная форма представления показателей технической эксплуатации автомобилей //Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2020. – №. 1. – С. 10-15.
56. Арифуллин И. В., Терентьев А. В., Егунова Т. Н. Применение технико-экономического критерия для определения показателя пробега эффективной эксплуатации автомобиля //Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2020. – №. 3. – С. 70-74.
57. Райкин А. Л. Элементы теории надежности для проектирования технических систем. – 1967.
58. Федоров В. К., Кравченко И. Н., Ерофеев М. Н. Эксплуатация подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин. Разработка годового плана и месячного плана-графика технического обслуживания и ремонта подъемно-транспортных, строительных, дорожных машин и автомобильного транспорта. – 2004.
59. Пухов Е. В., Тимошинов М. Г. Анализ направлений по совершенствованию технологий, оборудования и организации технического обслуживания транспортных и технологических машин в АПК //НАУКА ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА. – 2016. – С. 250-254.
60. Юрков Н. К. Риски отказов сложных технических систем //Надежность и качество сложных систем. – 2014. – №. 1 (5). – С. 18-24.

61. Положение о техническом обслуживании и ремонте подвижного состава автомобильного транспорта / Мин-во автомоб. Трансп. РСФСР. – М.: Транспорт, 1986. – 73 с.
62. Ананьин А. Д. и др. Диагностика и техническое обслуживание машин. – 2008.
63. Ивашко В. С., Кураш В. В., Кудина А. В. Надежность технических систем. – 2008.
64. Дынкин Е. Марковские процессы. – 1963.
65. Муралев А. А., Усанин С. Н., Чурсин А. А. К вопросу определения вероятности отказов приборов в процессе эксплуатации //Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. – №. 6-1 (96). – С. 81-83.
66. Тихонов В. И. М. М. А. Марковские процессы. – 1977.
67. Болбас М. М., Заяш И. В., Ротко И. А. Проектирование предприятий автомобильного транспорта: объемно-планировочное решение зданий для технического обслуживания и ремонта транспортных средств. – 2015.
68. Сурков С. В., Бахарев А. А. О повышении эффективности проведения технического обслуживания грузовых автомобилей //Наука и образование. – 2022. – Т. 5. – №. 3. – С. 167.
69. Виноградов Н. Н. и др. Техническое обслуживание и диагностика автомобилей //Фундаментальные научно-практические исследования: актуальные тенденции и инновации. – 2021. – С. 32-35.
70. Подхалюзина В. А. Автомобильный транспорт. Особенности функционирования в России. – 2015.
71. Хегай Ю. А. Проблемы автомобильного транспорта в России //Теория и практика общественного развития. – 2014. – №. 8. – С. 122-125.
72. Гольц Г. А. Транспорт и расселение. – 1981.
73. Агеев Е. В., Емельянов И. П. Технология технического обслуживания и ремонта автомобильного транспорта машиностроительных предприятий. – 2016.
74. Щербанин Ю. А. Транспорт и экономический рост: взаимосвязь и влияние //Евразийская экономическая интеграция. – 2011. – №. 3 (12). – С. 065-078.

75. Вучик В. Транспорт в городах, удобных для жизни. – Litres, 2022.
76. Пухов Е. В. Совершенствование системы утилизации отходов предприятий технического сервиса транспортных и технологических машин АПК. – 2013.
77. Подгорнова Н. А. Экологические проблемы автомобильного транспорта и пути решения //Молодой ученый. – 2016. – №. 22-2. – С. 126.
78. Алехин Р. В., Бахарев А. А. Пути повышения эффективности ремонтов автомобильного транспорта //Наука и образование. – 2022. – Т. 5. – №. 3. – С. 155.
79. Арифуллин И. В. И др. Система жизненного цикла запасных частей подвижного состава //Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2014. – №. 1. – С. 56-58.
80. Ременцов А. Н., Зенченко В. А., Фетисов П. Б. Математическая модель определения и планирования потребности в запасных частях //Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2010. – №. 3. – С. 7-11.
81. Смирнов П.А. Разработка комплексной системы технического обслуживания автомобилей: дис. ... д-ра техн. Наук. – М., 2020. – 312 с.
82. Кравченко И. Н. и др. Ресурсосберегающие технологии ремонта сельскохозяйственной техники. – 2018.
83. Агеева Е. В. Повышение качества ремонта и восстановления деталей современных транспортных систем //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2011. – №. 4. – С. 208-213.
84. Новиков В. А. и др. Увеличение эффективности транспортных средств через прогнозирование потребности в запчастях //Форум молодых ученых. – 2020. – №. 10 (50). – С. 518-521.
85. Болбас М. М., Заяш И. В., Ротко И. А. Проектирование предприятий автомобильного транспорта: объемно-планировочное решение зданий для технического обслуживания и ремонта транспортных средств. – 2015.
86. Кирасиров О. М., Кирасиров Д. М., Скудаева Е. А. Технологии логистических операций на предприятиях автосервиса. – 2021.

87. Материалы международной конференции “Техническое обслуживание и ремонт автотранспорта”. – М.: МАДИ, 2019. – 420 с.
88. Труды конференции “Современные технологии в автосервисе”. – СПб.: СПбГАСУ, 2020. – 385 с.
89. Арифуллин И. В. Оптимизация технического обслуживания автомобилей (на примере аэродромных машин) с использованием основ логистических принципов доставки запасных частей //Вестник гражданских инженеров. – 2016. – №. 3. – С. 218-220.
90. Арифуллин И. В. Методика организации поставок запасных частей для специальных автомобилей, эксплуатирующихся в аэропортах //Вестник гражданских инженеров. – 2017. – №. 3. – С. 211-215.
91. Неруш Ю. М., Неруш А. Ю. Логистика. – Общество с ограниченной ответственностью Издательство ЮРАЙТ, 2019.
92. Тебекин А. В. Логистика. – 2018.
93. Аникин Б. А. и др. Логистика. – 2015.
94. Волгин В. Склад: логистика, управление, анализ. – Litres, 2022.
95. Волгин В. Логистика хранения товаров: практическое пособие. – Litres, 2022.
96. Матвеева А. А., Якимова Д. О., Товстонощенко В. Н. Модель «Точно в срок» в логистике //Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2012. – Т. 2. – №. 8. – С. 249-251.
97. Пимонова Т. К. и др. Логистика запасов как эффективное управление деятельностью предприятия //Корпоративная экономика. – 2015. – №. 2. – С. 32-38.
98. Шведов В. Е., Иванова Н. В., Утушкина А. Е. Транспортная логистика. Грузовые комплексы на транспорте. – 2019.
99. Арифуллин И. В. Оптимизация технического обслуживания автомобилей (на примере аэродромных машин) с использованием основ логистических принципов доставки запасных частей //Вестник гражданских инженеров. – 2016. – №. 3. – С. 218-220.

100. Кудинова А. В., Степаненко А. В., Кудинова Е. В. ОСОБЕННОСТИ КАЛЬКУЛИРОВАНИЯ СЕБЕСТОИМОСТИ ПРОДУКЦИИ МЕТОДОМ ЛТ» ТОЧНО В СРОК» //Кластерные инициативы в формировании прогрессивной структуры национальной экономики. – 2016. – С. 148-150.
101. Сапунова Т. А., Скубенко Д. В. Внедрение концепции «Точно в срок» на российских предприятиях //Инновационная наука. – 2016. – №. 11-1. – С. 157-158.
102. Щербаков В. В., Першин И. В. Классификация транспортной логистики в задаче мультимодальности грузоперевозок //Проблемы современной экономики. – 2015. – №. 3 (55). – С. 243-245.
103. Левкин Г. Г., Панова Е. А., Новикова Т. В. Анализ применения терминов» закупка» и» снабжение» в теории и практике логистики //Логистика. – 2018. – №. 7. – С. 42-45.
104. Ткач В. В. Проблемы моделирования цепей поставок //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. – 2010. – №. 39 (215). – С. 106-110.
105. Шумаев В. А. Теория и практика ресурсосбережения. – 2016.
106. Lai K., Cheng T. C. E. Just-in-time logistics. – Routledge, 2016.
107. Воронов А. В., Лысенко А. Л., Воронов В. И. Международная логистика. – 2023.
108. Воронов В. И., Воронов А. В. Международная логистика пространств и границ: основные аспекты формирования понятия, миссии, целей, задач, функций, интегральной логики, принципов и методов //Управление. – 2015. – №. 2 (8). – С. 27-36.
109. Эмиров Н., Эмирова А. Международная логистика. Учебное пособие для вузов. – Litres, 2021.
110. Сафонова А. А., Мирзаева А. Х. Международная логистика //Экономика и социум. – 2015. – №. 2-4 (15). – С. 241-243.

111. Lai C. L., Lee W. B., Ip W. H. A study of system dynamics in just-in-time logistics //Journal of materials processing technology. – 2003. – Т. 138. – №. 1-3. – С. 265-269.
112. Моковецкая О. Г. Международная логистика: современные тенденции развития. – 2013.
113. Лашко С. И., Лашко Т. А. Международная транспортная логистика //Научный вестник Южного института менеджмента. – 2016. – №. 4. – С. 21-27.
114. Green K. W., Inman R. A. The impact of JIT-II-selling on organizational performance //Industrial Management & Data Systems. – 2007. – Т. 107. – №. 7. – С. 1018-1035.
115. Зарипов А. Р. Логистика распределения (на примере цепей поставок запасных частей для грузовых автомобилей) //Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. – 2008. – №. 9. – С. 10-10.
116. Дыбская В. Логистика складирования. – Litres, 2022.
117. Лебедев Е. А., Наumenко М. А. Автомобильный транспорт в логистике //Международный конгресс» Архитектура, строительство, транспорт» 67-я научно-практическая конференция» Теория, методы проектирования машин и процессов в строительстве» посвящённая 100-летию со дня рождения засл. Деятели науки и техники РСФСР, д-ра техн. Наук, профессора ТВ Алексеевой (с международным участием). – 2013. – С. 202-206.
118. Емельянов В. В., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Теория и практика эволюционного моделирования //М.: физматлит. – 2003. – Т. 432.
119. Пилипчук С. Ф. Логистика предприятия. Складирование. – 2018.
120. Глинский В. В., Ионин В. Г. Статистический анализ. – 1998.
121. Сошникова Л. А., Тамашевич В. Н., Махнач Л. А. Многомерный статистический анализ. – Белорусский государственный экономический университет, 2004. – С. 162-162.
122. Елисеева И. и др. Статистика. – 2011.

123. Зинченко А. П. и др. Математическая статистика. – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования» Российский государственный аграрный университет-МСХА им. КА Тимирязева», 2018.
124. Афанасенко И. Д., Борисова В. В. Логистика снабжения. – 2018.
125. Ермаков С.М. и др. Математическая теория планирования эксперимента. – М.: Наука, 1983. – 291с.
126. Цветков В. Я. Инкрементное информационное моделирование //Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – №. 3-3. – С. 500-501.
127. Емельянов А.А. Имитационное моделирование экономических процессов: учеб. Пособие / А.А. Емельянов, Е.А. Власова, Р.В. Дума. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 368 с.
128. Варфоломеев В.И. Алгоритмическое моделирование экономических систем: практикум: учеб. Пособие / В.И. Варфоломеев, С.В. Назаров. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 264 с.
129. Хмурович А. М., Хохлова Н. М. Международная логистика в 2021 г //Материалы Международной научно-практической студенческой конференции [Электронный ресурс]/редкол. ВВ Манкевич [и др.].–Минск: Институт бизнеса БГУ. – 2021. – С. 321-323.
130. Нехороших И. Н., Мамонтов Н. Ю. Логистика в сфере международного бизнеса //Дельта науки. – 2017. – №. 3. – С. 27-31.
131. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. – Рипол Классик, 1963.
132. Файнштейн А. Основы теории информации. – Рипол Классик, 2013.
133. дер Варден Б. Л. В. Математическая статистика. – Рипол Классик, 2013.
134. Бочкарев А.А. Планирование и моделирование цепи поставок: учебно-практическое пособие / А. А. Бочкарев. – М.: «Альфа-Пресс», 2008. – 192 с.
135. Акопов А. С. Имитационное моделирование. – 2015.

136. Пилипчук С. Ф. Логистика предприятия. Складирование: учебное пособие. – 2017.
137. Панин В. В. Основы теории информации. – 2012.
138. Кононюк А. Е. Обобщенная теория моделирования //Начала. К. – 2012. – Т. 1.
139. Толуев Ю. И. Имитационное моделирование логистических сетей //Логистика и управление цепями поставок. – 2008. – №. 2. – С. 25.
140. Кобелев Н. Б., Половников В. А., Девятков В. В. Имитационное моделирование. – 2020.
141. Эльберг М. С. И др. Имитационное моделирование //Красноярск: Сиб. Федер. Ун-т. – 2017.
142. Строгалева В. П., Толкачева И. О. Имитационное моделирование. – 2018.
143. Альсова О. К. Моделирование систем //учебное пособие/ОК Альсова. – 2007.
144. Емельянов А. А., Власова Е. А., Дума Р. В. Имитационное моделирование экономических процессов //М., Финансы и статистика. – 2002. – С. 17-23.
145. ФЕДОРОВ И. Б. и др. Математическое моделирование в технике и в технологии.
146. Боев В. Д. Имитационное моделирование систем. – 2020.
147. Рыжиков Ю. И. Логистика, запасы, очереди //Интегрированная логистика. – 2009. – №. 6. – С. 6-6.
148. Шалыгин А. С., Палагин Ю. И. Прикладные методы статистического моделирования. – 1986.
149. Розенберг И. Н., Цветков В. Я. Экономико-математические методы моделирования. – 2015.
150. Митюгин В. А., Фролов Н. А. Развитие теорий моделирования транспортных потоков //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – №. 6-1. – С. 68-76.
151. Лукашевич В. К. Модели и метод моделирования в человеческой деятельности. – 1983.

152. Чехарин Е. Е. Информационное моделирование //Славянский форум. – 2021. – №. 4 (34). – С. 151.
153. Бусленко Н. П. Метод статистического моделирования. – 1970.
154. Королев А. Л. Компьютерное моделирование //М.: Бином. Лаборатория знаний. – 2013. – Т. 230.
155. Тарасевич Ю. Ю. Математическое и компьютерное моделирование. – 2001.
156. Кононюк А. Е. Обобщенная теория моделирования //Начала. К. – 2012. – Т. 1.
157. Снитюк В. Е. Прогнозирование. Модели, методы, алгоритмы //Киев:«Маклаут. – 2008.
158. Стратонович Р. Л. Теория информации. – Сов. Радио, 1975.
159. Бриллюэн Л. Наука и теория информации. – Рипол Классик, 2013.
160. Громов А. И., Фляйшман А., Шмидт В. Управление бизнес-процессами: современные методы. – 2019.
161. Ханк Д., Райтс А. Д., Дин У. Бизнес-прогнозирование. – Вильямс, 2003.
162. Долганова О. И., Виноградова Е. В., Лобанова А. М. Моделирование бизнес-процессов. – 2016.
163. Всяких Е. и др. Практика и проблематика моделирования бизнес-процессов. – Litres, 2022.
164. Дж М. Технологическое прогнозирование. – 1977.
165. Амосов Н. М. Моделирование сложных систем //Киев: Наукова думка. – 1968. – Т. 88.
166. Растригин Л. А. Адаптация сложных систем. – 1981.
167. Алексеева М. Б., Балан С. Н. Основы теории систем и системного анализа //СПб.: СПбГИЭУ. – 2002.
168. Квейд Э. Анализ сложных систем. – 1969.
169. Мамонова В. Г., Ганелина Н. Д., Мамонова Н. В. Моделирование бизнес-процессов. – 2012.
170. Щербаков В. В., Мерзляк А. В., Коскур-Оглы Е. О. Автоматизация бизнес-процессов в логистике. – 2016.

171. Пермяков В. Н., Новоселов О. А., Макарова А. Н. Моделирование закономерностей распределения наработок на отказ бульдозеров при строительстве оснований для нефтегазовых объектов //Инженерный вестник Дона. – 2014. – Т. 29. – №. 2. – С. 112.
172. Брынцев А. Н. Понятие логистического поля //Риск: ресурсы, информация, снабжение, конкуренция. – 2010. – №. 3. – С. 106-108.
173. Запорожцев А. В. Моделирование технических систем //Фундаментальные исследования. – 2014. – №. 8-6. – С. 1288-1294.
174. Белов А. Г., Моисеев С. А., Григорьев А. В. Методы имитационного моделирования //Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2014. – Т. 1. – С. 277-279.
175. Алиев А. В., Мищенко О. В. Математическое моделирование в технике. – 2012.
176. Уемов А. И. Логические основы метода моделирования. – Рипол Классик, 2013.
177. Волхонов М. С. И др. О РАЗВИТИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОТ АНТИЧНОСТИ ДО НАШИХ ДНЕЙ //Вестник Казанского ГАУ №. – 2018. – Т. 1. – №. 48. – С. 120.
178. Алгазинов Э. К., Сирота А. А. Анализ и компьютерное моделирование информационных процессов и систем. – 2009.
179. Широбокова С. Н., Хашиева Л. Н. Разработка информационных моделей экономических систем с использованием унифицированного языка моделирования UML. – 2002.
180. Корилов А. М., Павлов С. Н. Теория систем и системный анализ. – 2017.
181. Chivers I. et al. An introduction to Algorithms and the Big O Notation //Introduction to Programming with Fortran: With Coverage of Fortran 90, 95, 2003, 2008 and 77. – 2015. – С. 359-364.
182. Звонарев С. В. Основы математического моделирования: учебное пособие. – 2019.

183. Бродский Ю. И. Модельный синтез и модельно-ориентированное программирование //IX Всероссийская научная конференция «Математическое моделирование развивающейся экономики, экологии и технологий», ЭКОМОД-2016,[Электронный ресурс]: г. Киров, 4-9 июля 2016/Сборник материалов конференции.//Под ред. ИГ Поспелова и АВ Шатрова.– 2013. – С. 10.
184. Брусакова И. А., Чертовской В. Д. Информационные системы и технологии в экономике. – 2007.
185. Ашманов С. А. Линейное программирование. – Рипол Классик, 1981.
186. Калинин П. Динамическое программирование. – 2008.
187. Штерензон В. А. Моделирование технологических процессов //Конспект лекций. Екатеринбург: Изд-во РГППУ. – 2010. – С. 66.
188. Ясенев В. Н. Информационные системы и технологии в экономике. – 2012.
189. Ховард Р. А. Динамическое программирование и марковские процессы. – 1964.
190. Титторенко Г. А. и др. Информационные системы и технологии управления. – 2013.
191. Терентьев А. В. Многокритериальный показатель качества автомобиля //Вестник гражданских инженеров. – 2015. – №. 1. – С. 201-204.
192. Терентьев А. В. Развитие метода районирования //Инновации на транспорте и в машиностроении. – 2016. – С. 127-130.
193. Терентьев А. В., Ефименко Д. Б., Карелина М. Ю. Методы районирования как методы оптимизации автотранспортных процессов //Вестник гражданских инженеров. – 2017. – №. 6. – С. 291-294.
194. Карелина М. Ю., Арифуллин И. В., Терентьев А. В. Аналитическое определение весовых коэффициентов при многокритериальной оценке эффективности автотранспортных средств //Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2018. – №. 1. – С. 3-9.

195. Терентьев А. В. И др. Математические модели принятия решений в интеллектуальных транспортных системах //Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2021. – №. 1. – С. 106-113.
196. Арифуллин И. В., Терентьев А. В., Аллакин А. А. Метод оценки качества эксплуатации автотранспортных средств //Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2018. – №. 11. – С. 58-61.
197. Арифуллин И. В. Комплексная оценка качества доставки запасных частей для технического обслуживания автотранспортного парка //Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2016. – №. 2. – С. 37-41.
198. Сергеев В. И., Григорьев М. Н., Уваров С. А. Логистика: информационные системы и технологии. – 2008.
199. Амириди Ю. В., Кочанова Е. Р., Морозова О. А. Информационные системы в экономике. – 2009.
200. Каллаур Г. Ю. Обоснование инвестиций в технологии информационного моделирования //Экономика строительства. – 2018. – №. 1 (49). – С. 27-38.
201. Абакумов Р. Г., Наумов А. Е., Зобова А. Г. Преимущества, инструменты и эффективность внедрения технологий информационного моделирования в строительстве //Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2017. – №. 5. – С. 171-181.
202. Жданов С., Соболева М., Алфимова А. Информационные системы. – Litres, 2015.
203. Милов В. Р. И др. Способ управления техническим состоянием на основе прогнозирования //Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2010. – Т. 8. – №. 2. – С. 5-11.
204. Луценко Е. В. Интеллектуальные информационные системы. – 2004.
205. Грекул В. И., Денищенко Г. Н., Коровкина Н. Л. Управление внедрением информационных систем. – 2017.

206. Арифуллин И. В. Методика организации поставок запасных частей для специальных автомобилей, эксплуатирующихся в аэропортах: дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / Арифуллин Илья Владимирович. — Санкт-Петербург, 2017. — 140 с.
207. Арифуллин И. В. Методика организации поставок запасных частей для специальных автомобилей, эксплуатирующихся в аэропортах: автореф. дис. канд. техн. наук : 05.22.10 / И. В. Арифуллин ; Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ). — Санкт-Петербург, 2017. — 22 с.
208. 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.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Результаты моделирования одного цикла

Номер итерации	Текущее состояние, у.е.	Суточная производительность, у.е./сут
0	500,0000	0
1	505,9745	5,9745
2	515,2889	9,3144
3	520,2539	4,965
4	528,0251	7,7712
5	531,0045	2,9794
6	537,6135	6,609
7	543,5997	5,9862
8	547,2183	3,6186
9	552,25	5,0317
10	557,9182	5,6682
11	563,6143	5,6961
12	569,0762	5,4619
13	572,9232	3,847
14	575,5354	2,6122
15	581,6632	6,1278
16	588,9861	7,3229
17	594,6255	5,6394
18	602,5016	7,8761
19	606,2024	3,7008
20	611,535	5,3326
21	618,4642	6,9292

22	624,9305	6,4663
23	632,6255	7,695
24	634,6662	2,0407
25	637,635	2,9688
26	640,2939	2,6589
27	645,0462	4,7523
28	653,3907	8,3445
29	654,4249	1,0342
30	663,2096	8,7847
31	670,6048	7,3952
32	678,0285	7,4237
33	685,5742	7,5457
34	692,489	6,9148
35	701,0739	8,5849
36	706,4519	5,378
37	714,0349	7,583
38	719,034	4,9991
39	728,3775	9,3435
40	733,5895	5,212
41	746,7532	13,1637
42	754,3427	7,5895
43	760,6819	6,3392
44	768,1463	7,4644
45	775,5944	7,4481
46	778,8291	3,2347
47	781,5855	2,7564
48	784,4985	2,913
49	795,5384	11,0399
50	801,274	5,7356

51	802,968	1,694
52	807,0293	4,0613
53	811,7509	4,7216
54	813,7034	1,9525
55	820,4745	6,7711
56	823,4416	2,9671
57	827,2794	3,8378
58	832,4243	5,1449
59	839,3673	6,943
60	845,2715	5,9042
61	846,4961	1,2246
62	853,8399	7,3438
63	856,3122	2,4723
64	863,7349	7,4227
65	866,3199	2,585
66	870,2726	3,9527
67	875,0497	4,7771
68	880,5774	5,5277
69	885,9391	5,3617
70	891,5301	5,591
71	898,0985	6,5684
72	900,8466	2,7481
73	908,5827	7,7361
74	908,9826	0,399
75	909,3824	1,2509
76	913,2648	3,8824
77	920,7477	7,4829
78	928,768	8,0203
79	936,9894	8,2214

80	940,3572	3,3678
81	951,2025	10,8453
82	958,4204	7,2179
83	963,5193	5,0989
84	967,549	4,0297
85	979,3114	11,7624
86	982,6524	3,341
87	986,3424	3,69
88	991,0457	4,7033
89	993,7804	2,7347
90	1000,915	7,1346
91	1004,6912	3,7762
92	1006,1008	1,4096
93	1011,6053	5,5045
94	1018,6872	7,0819
95	1023,489	4,8018
96	1029,6522	6,1632
97	1035,8013	6,1491
98	1040,6965	4,8952
99	1044,69	3,9935
100	1049,8318	5,1418
101	1052,4231	2,5913
102	1058,0107	5,5876
103	1062,6281	4,6174
104	1064,2486	1,6205
105	1072,3173	8,0687
106	1079,4432	7,1259
107	1085,2869	5,8437
108	1087,735	2,4481

109	1090,8116	3,0766
110	1096,3456	5,534
111	1103,7668	7,4212
112	1105,599	1,8322
113	1113,1702	7,5712
114	1116,5316	3,3614
115	1124,153	7,6214
116	1129,1432	4,9902
117	1135,3581	6,2149
118	1141,3158	5,9577
119	1149,1726	7,8568
120	1157,6804	8,5078
121	1158,264	0,5836
122	1164,2789	6,0149
123	1176,7285	12,4496
124	1181,4537	4,7252
125	1187,873	6,4193
126	1195,7411	7,8681
127	1201,0548	5,3137
128	1207,7683	6,7135
129	1211,6179	3,8496
130	1216,5541	4,9362
131	1217,5998	1,0457
132	1222,7193	5,1195
133	1225,2873	2,568
134	1231,0022	5,7149
135	1235,0208	4,0186
136	1241,3401	6,3193
137	1248,5664	7,2263

138	1251,2619	2,6955
139	1255,7236	4,4617
140	1260,892	5,1684
141	1263,8595	2,9675
142	1267,7963	3,9368
143	1272,6392	4,8429
144	1274,6871	2,0479
145	1278,8154	4,1283
146	1286,479	7,6636
147	1296,898	10,419
148	1301,8855	4,9875
149	1306,307	4,4215
150	1314,3994	8,0924
151	1316,2536	1,8542
152	1321,3627	5,1091
153	1324,1091	2,7464
154	1329,8887	5,7796
155	1338,5792	8,6905
156	1343,1713	4,5921
157	1347,8639	4,6926
158	1350,8663	3,0024
159	1357,1955	6,3292
160	1362,5928	5,3973
161	1371,5836	8,9908
162	1371,8905	0,3069
163	1376,4226	4,5321
164	1382,419	5,9964
165	1390,8246	8,4056
166	1398,509	7,6844

167	1405,2938	6,7848
168	1411,3861	6,0923
169	1417,7492	6,3631
170	1422,2487	4,4995
171	1428,0548	5,8061
172	1436,7537	8,6989
173	1437,8124	1,0587
174	1446,4743	8,6619
175	1449,258	2,7837
176	1457,3499	8,0919
177	1463,6693	6,3194
178	1469,1023	5,433
179	1476,3992	7,2969
180	1480,0741	3,6749
181	1482,2954	2,2213
182	1486,2689	3,9735
183	1491,3876	5,1187
184	1500,7125	9,3249
185	1505,6202	4,9077
186	1509,2856	3,6654
187	1518,2281	8,9425
188	1523,9997	5,7716
189	1528,2517	4,252
190	1534,1716	5,9199
191	1539,2675	5,0959
192	1546,3404	7,0729
193	1551,8053	5,4649
194	1556,7506	4,9453
195	1565,0353	8,2847

196	1565,7536	0,7183
197	1573,6459	7,8923
198	1576,8656	3,2197
199	1578,5737	1,7081
200	1582,8918	4,3181
201	1588,9287	6,0369
202	1593,5841	4,6554
203	1598,8563	5,2722
204	1604,3013	5,445
205	1609,4695	5,1682
206	1615,7915	6,322
207	1620,0622	4,2707
208	1628,7343	8,6721
209	1631,4084	2,6741
210	1635,5764	4,168
211	1643,8036	8,2272
212	1651,2089	7,4053
213	1661,4358	10,2269
214	1666,6137	5,1779
215	1668,3709	1,7572
216	1672,8457	4,4748
217	1684,3109	11,4652
218	1688,8134	4,5025
219	1698,07	9,2566
220	1699,1641	1,0941
221	1702,9321	3,768

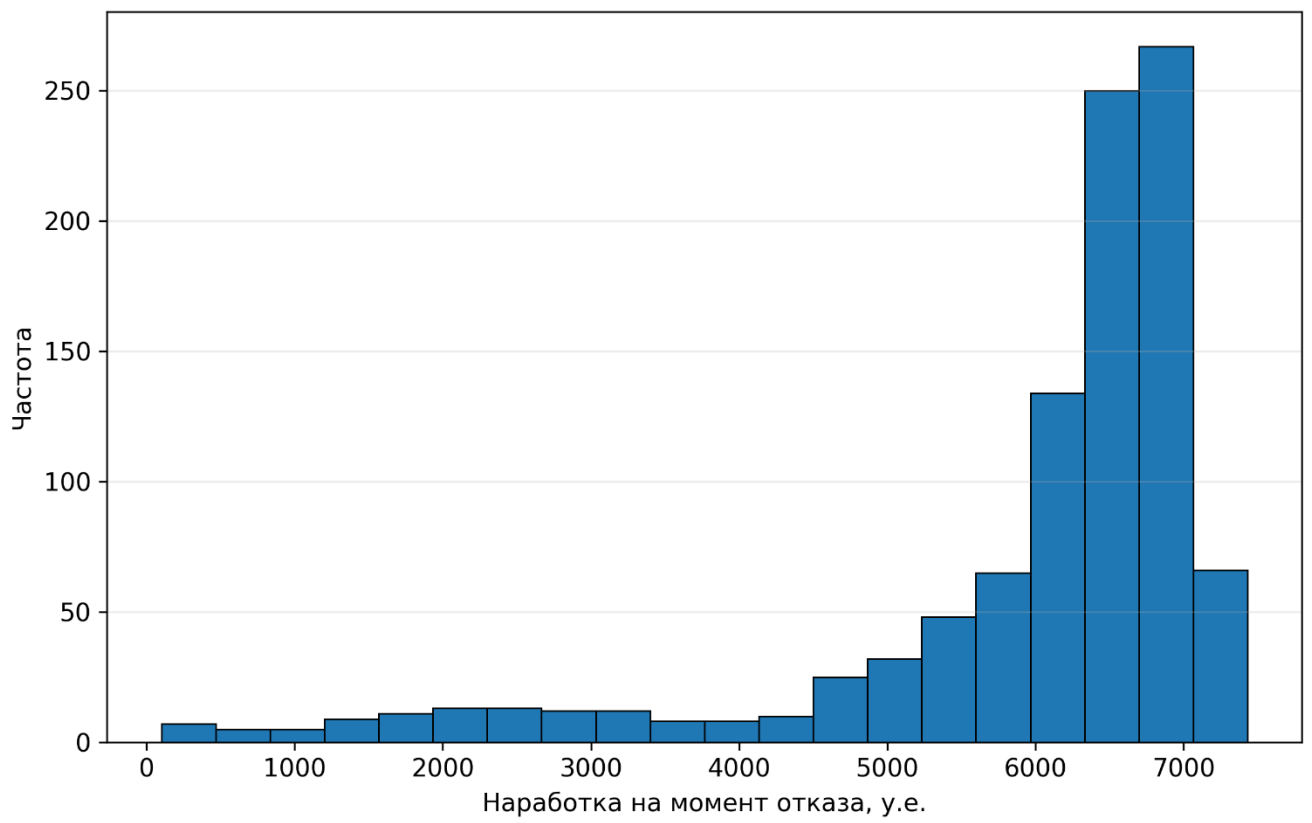


Рисунок А.1 – Распределение наработки на момент отказа

Результаты моделирования тысячи циклов одной детали

Номер цикла моделирования	Наработка на момент отказа, у.е.	Вероятность отказа при отказе	Количество отработанных дней детали, сут.
1	6573	0,054	133
2	6503	0,0509	131
3	6882	0,0702	137
4	6442	0,0483	127
5	5775	0,0274	116
6	2190	0,0013	45
7	7243	0,0955	147
8	3112	0,0028	63
9	7180	0,0905	145
10	6622	0,0563	131
11	6882	0,0702	139
12	6575	0,0541	131
13	1741	0,0009	35
14	7037	0,0802	142
15	6467	0,0493	133
16	6860	0,0689	141
17	5462	0,021	108
18	7074	0,0828	140
19	2152	0,0013	43
20	6901	0,0714	143
21	6758	0,0632	134
22	6753	0,063	138

23	6888	0,0706	138
24	6006	0,0333	120
25	6692	0,0597	134
26	6241	0,0407	123
27	5120	0,0157	101
28	6748	0,0627	133
29	6620	0,0562	135
30	6066	0,0351	120
31	6618	0,0561	134
32	4708	0,011	93
33	6497	0,0506	131
34	6761	0,0634	135
35	3114	0,0028	61
36	6922	0,0727	136
37	2932	0,0024	57
38	6553	0,0531	134
39	5714	0,026	111
40	5542	0,0224	112
41	6423	0,0475	132
42	6504	0,0509	134
43	6397	0,0465	123
44	6003	0,0332	125
45	5452	0,0208	109
46	6128	0,0369	123
47	7037	0,0802	140
48	6607	0,0556	133
49	7090	0,0839	143
50	6787	0,0648	131
51	1538	0,0007	31

52	7264	0,0973	144
53	6499	0,0507	132
54	6016	0,0336	121
55	6831	0,0673	140
56	6879	0,0701	138
57	6522	0,0517	129
58	2200	0,0013	44
59	5443	0,0206	106
60	6412	0,0471	128
61	6920	0,0725	140
62	6164	0,0381	128
63	6790	0,0649	138
64	6627	0,0566	132
65	7146	0,088	144
66	6823	0,0668	139
67	2637	0,0019	52
68	5790	0,0277	116
69	1953	0,0011	39
70	5576	0,0231	110
71	6603	0,0554	134
72	5372	0,0194	105
73	4142	0,0068	83
74	3454	0,0038	69
75	6518	0,0515	131
76	6636	0,057	136
77	5932	0,0313	119
78	6917	0,0724	136
79	4821	0,0121	96
80	6556	0,0532	134

81	7351	0,1047	147
82	2446	0,0016	49
83	5359	0,0192	106
84	6888	0,0706	138
85	7005	0,078	139
86	6726	0,0615	133
87	6935	0,0735	138
88	6473	0,0496	128
89	6508	0,0511	130
90	6467	0,0493	129
91	6426	0,0476	127
92	7156	0,0887	147
93	6416	0,0472	126
94	6754	0,063	134
95	2803	0,0022	58
96	5821	0,0285	112
97	6073	0,0353	119
98	6515	0,0514	129
99	5731	0,0264	112
100	6877	0,0699	130
101	2369	0,0015	45
102	6553	0,0531	130
103	6622	0,0563	135
104	6443	0,0483	127
105	7101	0,0846	140
106	6697	0,06	133
107	6493	0,0504	127
108	6110	0,0364	123
109	6625	0,0564	131

110	2645	0,0019	55
111	7119	0,086	144
112	6546	0,0528	134
113	6682	0,0593	131
114	6503	0,0509	130
115	6712	0,0608	134
116	6790	0,065	137
117	2898	0,0024	57
118	2639	0,0019	52
119	5228	0,0172	108
120	5299	0,0182	105
121	6515	0,0514	129
122	2903	0,0024	57
123	6104	0,0362	122
124	5586	0,0233	113
125	6633	0,0568	130
126	6531	0,0521	128
127	6082	0,0355	122
128	6606	0,0555	133
129	6897	0,0711	138
130	3176	0,003	64
131	6421	0,0474	130
132	6858	0,0689	135
133	6147	0,0376	124
134	6605	0,0555	132
135	6767	0,0637	136
136	6862	0,0691	140
137	6935	0,0735	139
138	6730	0,0617	134

139	1542	0,0007	31
140	6134	0,0372	124
141	6800	0,0655	136
142	7253	0,0964	142
143	6466	0,0493	127
144	6411	0,047	128
145	4383	0,0084	86
146	6833	0,0674	137
147	6771	0,0639	134
148	5687	0,0254	113
149	6285	0,0423	126
150	6024	0,0338	123
151	3920	0,0056	77
152	5294	0,0182	105
153	6957	0,0749	136
154	6162	0,038	125
155	6724	0,0614	133
156	7026	0,0795	144
157	6991	0,0771	140
158	7045	0,0807	140
159	6818	0,0665	136
160	6497	0,0506	124
161	6826	0,067	133
162	6634	0,0569	133
163	6712	0,0608	132
164	3036	0,0027	62
165	5828	0,0286	117
166	6628	0,0566	133
167	6653	0,0578	132

168	6783	0,0646	139
169	6273	0,0418	125
170	6374	0,0456	129
171	6958	0,075	138
172	5877	0,0299	116
173	5958	0,032	120
174	6705	0,0604	131
175	6789	0,0649	134
176	6850	0,0684	137
177	6632	0,0568	129
178	7021	0,0791	140
179	6662	0,0583	131
180	6058	0,0348	114
181	5473	0,0212	111
182	4781	0,0117	96
183	3068	0,0027	58
184	6650	0,0577	133
185	5944	0,0316	116
186	5713	0,026	115
187	6346	0,0445	129
188	6742	0,0624	137
189	6463	0,0492	130
190	6991	0,0771	137
191	6658	0,0581	130
192	6034	0,0341	122
193	6459	0,049	128
194	7031	0,0798	139
195	3450	0,0038	69
196	6173	0,0384	125

197	6114	0,0365	125
198	6465	0,0492	130
199	6946	0,0742	140
200	2007	0,0011	43
201	4616	0,0102	96
202	5651	0,0246	115
203	1847	0,001	36
204	6749	0,0627	138
205	6858	0,0688	136
206	5551	0,0226	111
207	6372	0,0455	124
208	6827	0,067	138
209	6338	0,0442	126
210	2503	0,0017	50
211	6847	0,0682	136
212	330	0,0003	7
213	5964	0,0321	118
214	2174	0,0013	45
215	1755	0,0009	36
216	6892	0,0708	136
217	6970	0,0757	139
218	6816	0,0664	136
219	6381	0,0459	129
220	6423	0,0475	127
221	5911	0,0307	114
222	6081	0,0355	122
223	6029	0,034	122
224	6060	0,0349	121
225	5230	0,0172	103

226	6612	0,0558	131
227	6791	0,065	133
228	5427	0,0203	110
229	6853	0,0686	137
230	1923	0,001	37
231	6318	0,0435	127
232	6642	0,0573	135
233	6725	0,0615	136
234	6828	0,0671	140
235	6829	0,0672	136
236	5086	0,0152	102
237	6642	0,0573	133
238	7011	0,0784	144
239	3744	0,0049	73
240	3208	0,0031	62
241	6211	0,0397	122
242	5202	0,0168	101
243	7088	0,0837	143
244	6138	0,0373	124
245	6597	0,0551	129
246	6035	0,0341	123
247	4323	0,0079	84
248	6801	0,0656	136
249	6856	0,0687	137
250	6411	0,047	131
251	6219	0,0399	126
252	6225	0,0401	125
253	6194	0,0391	124
254	6983	0,0765	142

255	6079	0,0355	122
256	1959	0,0011	40
257	6646	0,0575	131
258	6497	0,0506	133
259	6312	0,0432	127
260	7184	0,0908	145
261	5155	0,0161	102
262	3372	0,0035	68
263	6016	0,0336	120
264	6716	0,061	130
265	5622	0,024	110
266	5555	0,0227	110
267	6701	0,0602	135
268	6573	0,054	131
269	4618	0,0102	91
270	4771	0,0116	91
271	6141	0,0374	124
272	6610	0,0557	132
273	7002	0,0778	145
274	6761	0,0634	136
275	6480	0,0499	121
276	7168	0,0897	142
277	6738	0,0622	139
278	5187	0,0166	108
279	6719	0,0611	135
280	6243	0,0408	124
281	5871	0,0297	116
282	6598	0,0552	134
283	6825	0,0669	139

284	6780	0,0644	138
285	6863	0,0691	138
286	6899	0,0713	135
287	6336	0,0441	130
288	6866	0,0693	136
289	6611	0,0558	132
290	1991	0,0011	40
291	6713	0,0608	130
292	7095	0,0843	141
293	6055	0,0347	122
294	5325	0,0187	106
295	4393	0,0084	90
296	3935	0,0057	78
297	6857	0,0688	138
298	6498	0,0507	129
299	3929	0,0057	76
300	5071	0,015	104
301	6643	0,0573	129
302	6982	0,0765	136
303	6748	0,0627	135
304	5677	0,0252	112
305	4728	0,0112	92
306	6867	0,0694	136
307	5716	0,026	115
308	5692	0,0255	116
309	6455	0,0488	130
310	6619	0,0561	135
311	6800	0,0655	134
312	6107	0,0363	125

313	6211	0,0397	125
314	6664	0,0584	132
315	7055	0,0814	142
316	6798	0,0654	135
317	2970	0,0025	59
318	7026	0,0794	140
319	6259	0,0413	127
320	7176	0,0903	146
321	7139	0,0874	145
322	6258	0,0413	128
323	6707	0,0605	134
324	6681	0,0592	130
325	6676	0,0589	134
326	6721	0,0612	135
327	6133	0,0371	128
328	6849	0,0683	134
329	6963	0,0753	140
330	6686	0,0594	132
331	6170	0,0383	127
332	6507	0,051	130
333	6687	0,0595	132
334	6509	0,0511	128
335	2435	0,0016	48
336	6615	0,056	132
337	6384	0,046	126
338	6864	0,0692	136
339	7019	0,0789	141
340	4754	0,0115	94
341	6479	0,0499	129

342	6644	0,0573	134
343	6765	0,0636	137
344	6569	0,0538	134
345	6883	0,0703	140
346	6698	0,0601	131
347	6633	0,0568	135
348	6903	0,0715	136
349	6602	0,0554	132
350	7265	0,0973	146
351	6973	0,0759	135
352	6664	0,0583	133
353	1652	0,0008	32
354	7091	0,084	143
355	6235	0,0405	126
356	7294	0,0998	146
357	6862	0,0691	139
358	6999	0,0776	137
359	7126	0,0865	140
360	7117	0,0858	144
361	7326	0,1026	148
362	5288	0,0181	107
363	6005	0,0333	115
364	4965	0,0137	98
365	5590	0,0234	110
366	6760	0,0633	134
367	5610	0,0238	111
368	6496	0,0506	129
369	6899	0,0713	134
370	5147	0,016	102

371	6891	0,0708	136
372	6993	0,0772	140
373	6684	0,0593	132
374	6962	0,0752	139
375	6785	0,0647	136
376	6653	0,0578	131
377	6953	0,0746	139
378	6428	0,0477	133
379	6434	0,048	126
380	7052	0,0812	140
381	6098	0,036	124
382	6648	0,0576	139
383	5987	0,0328	120
384	4504	0,0093	91
385	6682	0,0593	130
386	5226	0,0172	104
387	5805	0,0281	115
388	6465	0,0493	128
389	3413	0,0037	66
390	5003	0,0142	102
391	6698	0,0601	136
392	6684	0,0593	135
393	6667	0,0585	133
394	7129	0,0867	144
395	6101	0,0361	123
396	6126	0,0369	123
397	6898	0,0712	136
398	6770	0,0638	136
399	7038	0,0802	139

400	6553	0,0531	128
401	6474	0,0496	129
402	6638	0,0571	132
403	6739	0,0622	131
404	4975	0,0138	98
405	5530	0,0222	112
406	6140	0,0373	121
407	6715	0,0609	132
408	6041	0,0343	118
409	6552	0,053	127
410	6668	0,0586	136
411	6566	0,0537	133
412	6071	0,0352	121
413	5419	0,0202	107
414	4682	0,0108	91
415	6773	0,064	142
416	7213	0,0932	147
417	6226	0,0402	123
418	6945	0,0741	138
419	7219	0,0936	141
420	2158	0,0013	42
421	5729	0,0263	122
422	6828	0,0671	140
423	1610	0,0008	34
424	6448	0,0486	125
425	6402	0,0467	130
426	6780	0,0644	137
427	6550	0,053	128
428	5609	0,0238	112

429	5932	0,0313	120
430	6852	0,0685	138
431	6543	0,0526	131
432	6787	0,0648	134
433	3531	0,004	72
434	6561	0,0535	133
435	3164	0,003	64
436	6296	0,0426	122
437	7166	0,0895	147
438	6574	0,054	128
439	4908	0,0131	94
440	5916	0,0309	119
441	7264	0,0973	145
442	6373	0,0455	127
443	6389	0,0461	121
444	6909	0,0719	139
445	6135	0,0372	125
446	6599	0,0552	132
447	6308	0,0431	123
448	6827	0,067	138
449	6577	0,0542	131
450	5962	0,0321	117
451	4854	0,0125	99
452	6829	0,0671	134
453	6102	0,0362	121
454	6523	0,0517	127
455	6593	0,0549	131
456	6660	0,0582	134
457	6661	0,0582	132

458	6665	0,0584	131
459	3045	0,0027	59
460	6850	0,0683	137
461	5442	0,0206	110
462	5952	0,0318	117
463	7009	0,0783	141
464	666	0,0004	13
465	5703	0,0257	118
466	6438	0,0481	128
467	6857	0,0688	135
468	6595	0,055	132
469	5733	0,0264	116
470	7010	0,0784	139
471	6792	0,0651	134
472	7269	0,0977	143
473	6864	0,0692	139
474	6977	0,0761	140
475	6627	0,0566	133
476	6920	0,0726	142
477	5965	0,0322	114
478	6494	0,0505	128
479	6672	0,0588	138
480	6511	0,0512	130
481	5315	0,0185	105
482	6191	0,039	121
483	2458	0,0016	50
484	6525	0,0518	129
485	6408	0,0469	129
486	5539	0,0224	110

487	6944	0,0741	138
488	6692	0,0598	138
489	6542	0,0526	132
490	6590	0,0548	135
491	6223	0,0401	124
492	7135	0,0871	143
493	6218	0,0399	122
494	2825	0,0022	59
495	6561	0,0534	130
496	6403	0,0467	128
497	6153	0,0377	123
498	6717	0,061	137
499	6400	0,0466	126
500	1119	0,0005	21
501	6884	0,0704	134
502	6443	0,0483	135
503	6649	0,0576	131
504	6903	0,0715	140
505	5399	0,0199	110
506	7004	0,0779	136
507	6894	0,0709	136
508	6994	0,0773	137
509	6467	0,0493	127
510	5875	0,0298	120
511	7211	0,093	144
512	2230	0,0013	46
513	6759	0,0633	136
514	3884	0,0055	78
515	6369	0,0454	126

516	6773	0,064	133
517	6237	0,0406	123
518	6636	0,057	135
519	3467	0,0038	68
520	6991	0,0771	135
521	6186	0,0388	121
522	5195	0,0167	102
523	6623	0,0563	131
524	5872	0,0297	116
525	5877	0,0299	122
526	6344	0,0444	126
527	5404	0,02	107
528	6693	0,0598	138
529	5151	0,0161	102
530	7252	0,0963	146
531	6398	0,0465	127
532	174	0,0002	3
533	6468	0,0494	129
534	6982	0,0765	136
535	5476	0,0212	109
536	6154	0,0378	121
537	7184	0,0909	143
538	957	0,0005	21
539	5952	0,0318	122
540	2770	0,0021	55
541	5897	0,0304	119
542	6858	0,0688	138
543	6200	0,0393	123
544	6986	0,0768	140

545	6683	0,0593	130
546	6897	0,0712	139
547	6992	0,0772	144
548	6825	0,0669	135
549	6468	0,0494	131
550	1511	0,0007	30
551	6276	0,0419	126
552	6139	0,0373	124
553	6733	0,0619	135
554	6800	0,0655	132
555	5815	0,0283	117
556	6794	0,0652	130
557	5057	0,0148	99
558	5930	0,0312	116
559	7088	0,0838	143
560	5201	0,0168	105
561	6762	0,0634	138
562	4029	0,0062	80
563	6446	0,0484	128
564	6861	0,069	140
565	6520	0,0516	137
566	5608	0,0237	112
567	6857	0,0688	142
568	239	0,0002	5
569	5275	0,0179	102
570	6344	0,0444	125
571	6393	0,0463	127
572	4718	0,0111	90
573	6655	0,0579	136

574	6844	0,068	138
575	5810	0,0282	118
576	6090	0,0358	120
577	6688	0,0596	135
578	6488	0,0502	129
579	5938	0,0314	117
580	6548	0,0529	133
581	6241	0,0407	128
582	6627	0,0565	136
583	6826	0,067	136
584	6586	0,0546	128
585	6894	0,071	134
586	7042	0,0805	144
587	6721	0,0612	137
588	2648	0,0019	55
589	6073	0,0353	120
590	4647	0,0105	91
591	6041	0,0343	122
592	6993	0,0772	144
593	2399	0,0015	49
594	3153	0,0029	64
595	6599	0,0552	129
596	6490	0,0503	128
597	4662	0,0106	93
598	6262	0,0414	131
599	7085	0,0835	137
600	6828	0,0671	141
601	6434	0,048	131
602	4782	0,0117	92

603	5884	0,03	113
604	6860	0,0689	134
605	6696	0,06	135
606	3957	0,0058	81
607	6821	0,0667	139
608	6960	0,0751	139
609	6360	0,045	129
610	6887	0,0705	135
611	7086	0,0836	140
612	5420	0,0202	111
613	6928	0,0731	139
614	6454	0,0488	130
615	5057	0,0148	106
616	6876	0,0699	138
617	6847	0,0682	134
618	7086	0,0836	142
619	6017	0,0336	121
620	6397	0,0465	131
621	6449	0,0486	128
622	6009	0,0334	120
623	6935	0,0735	140
624	5717	0,026	113
625	6894	0,071	138
626	6526	0,0519	131
627	6502	0,0508	128
628	7188	0,0912	148
629	6778	0,0643	139
630	7094	0,0842	139
631	6894	0,071	140

632	6712	0,0608	132
633	6804	0,0657	136
634	5547	0,0225	112
635	4955	0,0136	99
636	6858	0,0688	135
637	5679	0,0252	112
638	6409	0,047	130
639	6932	0,0733	141
640	6280	0,0421	124
641	6509	0,0511	133
642	6549	0,0529	131
643	4497	0,0092	92
644	6310	0,0432	127
645	6039	0,0343	120
646	6740	0,0623	130
647	2270	0,0014	44
648	5308	0,0184	106
649	6718	0,0611	133
650	6218	0,0399	123
651	1801	0,0009	36
652	6623	0,0563	131
653	6717	0,0611	136
654	6501	0,0508	130
655	6664	0,0583	137
656	6429	0,0477	130
657	6140	0,0373	122
658	6402	0,0467	127
659	5389	0,0197	110
660	6739	0,0622	135

661	6538	0,0524	134
662	5376	0,0195	110
663	6904	0,0716	136
664	7024	0,0793	142
665	6756	0,0631	133
666	5984	0,0327	118
667	978	0,0005	20
668	5125	0,0157	103
669	6817	0,0665	137
670	339	0,0003	6
671	6959	0,075	138
672	6990	0,077	135
673	5295	0,0182	105
674	6125	0,0369	124
675	6088	0,0357	125
676	7127	0,0865	141
677	6496	0,0506	127
678	6229	0,0403	125
679	6395	0,0464	126
680	6320	0,0435	128
681	6193	0,0391	123
682	5908	0,0306	115
683	6329	0,0439	126
684	6444	0,0484	126
685	2825	0,0022	57
686	7001	0,0778	139
687	4601	0,0101	93
688	4781	0,0117	96
689	6353	0,0448	124

690	5681	0,0253	112
691	4899	0,013	100
692	5462	0,021	110
693	5492	0,0215	112
694	6144	0,0375	124
695	6523	0,0517	132
696	6965	0,0754	143
697	6756	0,0631	136
698	5017	0,0143	102
699	6244	0,0408	127
700	6708	0,0606	134
701	6260	0,0414	127
702	6745	0,0625	136
703	6754	0,063	131
704	6386	0,0461	126
705	6489	0,0503	130
706	7432	0,1122	152
707	7012	0,0785	140
708	6457	0,0489	130
709	5895	0,0303	116
710	5540	0,0224	112
711	6073	0,0353	123
712	7144	0,0878	137
713	7228	0,0943	147
714	5974	0,0324	120
715	6470	0,0495	132
716	4770	0,0116	99
717	4586	0,0099	88
718	6614	0,0559	133

719	5804	0,028	116
720	7268	0,0976	145
721	1952	0,0011	39
722	6179	0,0386	127
723	5900	0,0304	115
724	6589	0,0547	127
725	6160	0,038	123
726	5215	0,017	103
727	6346	0,0445	127
728	6812	0,0662	139
729	6524	0,0518	130
730	403	0,0003	8
731	1899	0,001	37
732	6516	0,0514	123
733	6824	0,0669	136
734	5485	0,0214	111
735	739	0,0004	14
736	7090	0,0839	142
737	6108	0,0363	122
738	1315	0,0006	25
739	4497	0,0092	91
740	5018	0,0144	99
741	2787	0,0021	54
742	6610	0,0557	135
743	3311	0,0034	68
744	5567	0,0229	116
745	6253	0,0411	125
746	6043	0,0344	122
747	6745	0,0625	138

748	5481	0,0213	108
749	6685	0,0594	135
750	4224	0,0073	88
751	6623	0,0563	129
752	4944	0,0135	97
753	6048	0,0345	121
754	6881	0,0702	135
755	7019	0,079	143
756	6143	0,0374	124
757	6125	0,0369	125
758	5130	0,0158	102
759	6868	0,0694	134
760	6819	0,0666	137
761	5554	0,0227	108
762	6199	0,0393	125
763	6205	0,0395	123
764	6999	0,0776	141
765	6327	0,0438	127
766	6901	0,0714	139
767	5106	0,0155	105
768	6436	0,048	131
769	6327	0,0438	126
770	6340	0,0443	121
771	6967	0,0755	139
772	6448	0,0485	125
773	6558	0,0533	129
774	6775	0,0642	137
775	5653	0,0247	109
776	1400	0,0007	29

777	5968	0,0322	119
778	7136	0,0873	145
779	6074	0,0353	123
780	6974	0,076	141
781	6731	0,0618	137
782	6784	0,0646	138
783	7067	0,0823	144
784	6152	0,0377	123
785	5249	0,0175	101
786	6987	0,0768	137
787	6674	0,0588	131
788	235	0,0002	4
789	6719	0,0612	134
790	7053	0,0813	138
791	6069	0,0351	122
792	6280	0,0421	128
793	4630	0,0103	90
794	6716	0,061	134
795	2176	0,0013	45
796	6232	0,0404	126
797	3815	0,0052	75
798	7136	0,0873	142
799	7221	0,0937	137
800	6785	0,0647	142
801	6387	0,0461	124
802	6193	0,0391	119
803	1356	0,0006	28
804	6876	0,0699	137
805	6483	0,05	134

806	6700	0,0601	133
807	6369	0,0454	127
808	6735	0,062	138
809	5953	0,0318	121
810	7075	0,0828	146
811	5076	0,0151	103
812	3544	0,0041	72
813	6265	0,0416	129
814	7106	0,085	144
815	7155	0,0887	144
816	6558	0,0533	127
817	7375	0,1069	151
818	5472	0,0211	107
819	6767	0,0637	135
820	6223	0,0401	121
821	872	0,0004	18
822	2815	0,0022	56
823	6189	0,0389	121
824	6333	0,044	126
825	6193	0,0391	121
826	6799	0,0655	134
827	6646	0,0575	134
828	6447	0,0485	134
829	6571	0,0539	130
830	5935	0,0314	122
831	1721	0,0009	35
832	6726	0,0615	131
833	7072	0,0826	142
834	6975	0,0761	142

835	4668	0,0107	90
836	3682	0,0046	76
837	6484	0,05	133
838	6052	0,0346	121
839	6390	0,0462	131
840	6890	0,0707	136
841	6858	0,0688	137
842	6445	0,0484	131
843	6865	0,0692	136
844	5825	0,0286	117
845	4590	0,01	89
846	6451	0,0487	129
847	5480	0,0213	112
848	7129	0,0867	141
849	6623	0,0564	133
850	6936	0,0736	136
851	6532	0,0522	128
852	7147	0,0881	146
853	6439	0,0482	130
854	6109	0,0364	125
855	6654	0,0578	136
856	6683	0,0593	131
857	4110	0,0066	81
858	6550	0,053	132
859	1508	0,0007	31
860	5857	0,0293	117
861	6988	0,0769	143
862	1411	0,0007	28
863	6207	0,0395	119

864	6506	0,051	131
865	4893	0,0129	97
866	5902	0,0305	122
867	2899	0,0024	56
868	6169	0,0383	117
869	1619	0,0008	33
870	6931	0,0732	138
871	6714	0,0609	135
872	6987	0,0768	141
873	7191	0,0914	147
874	6305	0,043	126
875	6964	0,0753	138
876	6551	0,053	133
877	6602	0,0554	133
878	5395	0,0198	111
879	6462	0,0491	130
880	6681	0,0592	133
881	6903	0,0715	137
882	6463	0,0492	125
883	6843	0,068	140
884	6660	0,0582	134
885	5337	0,0188	105
886	7018	0,0788	142
887	4902	0,013	100
888	5610	0,0238	111
889	6796	0,0653	137
890	6296	0,0427	130
891	6919	0,0725	135
892	5833	0,0287	117

893	6535	0,0523	132
894	6662	0,0583	138
895	5922	0,031	120
896	2302	0,0014	44
897	5799	0,0279	118
898	5244	0,0174	107
899	6530	0,052	134
900	6082	0,0355	123
901	6203	0,0394	124
902	6250	0,041	124
903	100	0,0002	2
904	6186	0,0388	123
905	7263	0,0972	146
906	6714	0,0609	137
907	6229	0,0403	127
908	5434	0,0205	118
909	6759	0,0633	132
910	6932	0,0733	134
911	6493	0,0504	130
912	4659	0,0106	92
913	6867	0,0693	134
914	6821	0,0667	140
915	744	0,0004	15
916	4790	0,0118	93
917	6899	0,0713	136
918	6347	0,0445	130
919	6755	0,0631	138
920	7109	0,0852	149
921	7173	0,09	140

922	6522	0,0517	130
923	5488	0,0214	111
924	6940	0,0738	141
925	6799	0,0655	138
926	5730	0,0263	117
927	7160	0,089	140
928	6958	0,0749	143
929	6402	0,0467	126
930	4537	0,0095	91
931	6392	0,0463	131
932	6373	0,0456	126
933	5884	0,03	116
934	6332	0,044	128
935	6862	0,069	135
936	4265	0,0076	89
937	1376	0,0006	27
938	6303	0,0429	127
939	5815	0,0283	118
940	3025	0,0026	62
941	1804	0,0009	39
942	724	0,0004	16
943	6258	0,0413	125
944	5925	0,0311	117
945	4994	0,0141	100
946	6342	0,0444	129
947	6958	0,075	140
948	1155	0,0005	23
949	7040	0,0804	137
950	6898	0,0712	141

951	6424	0,0475	130
952	6388	0,0461	128
953	6187	0,0389	120
954	7421	0,1112	147
955	6311	0,0432	125
956	6833	0,0674	134
957	6617	0,0561	135
958	5981	0,0326	118
959	6520	0,0516	132
960	6781	0,0644	138
961	6594	0,055	129
962	4284	0,0077	85
963	693	0,0004	13
964	6951	0,0745	141
965	6790	0,065	138
966	6827	0,067	134
967	6290	0,0424	122
968	2432	0,0016	47
969	7087	0,0837	147
970	6907	0,0718	140
971	2360	0,0015	46
972	5647	0,0245	111
973	4490	0,0092	91
974	6874	0,0698	139
975	3056	0,0027	62
976	5590	0,0234	113
977	6463	0,0492	128
978	6892	0,0709	139
979	7028	0,0796	143

980	6893	0,0709	138
981	7164	0,0893	141
982	6882	0,0702	137
983	6745	0,0625	131
984	6777	0,0642	136
985	6766	0,0637	138
986	6009	0,0334	123
987	6680	0,0592	135
988	6285	0,0423	127
989	7008	0,0782	138
990	6353	0,0448	125
991	6752	0,0629	135
992	5954	0,0319	121
993	6677	0,059	129
994	7125	0,0864	144
995	6977	0,0762	140
996	6669	0,0586	134
997	6832	0,0673	135
998	6890	0,0707	140
999	6841	0,0679	139
1000	7217	0,0934	145
Среднее	5961	0,046	119,19

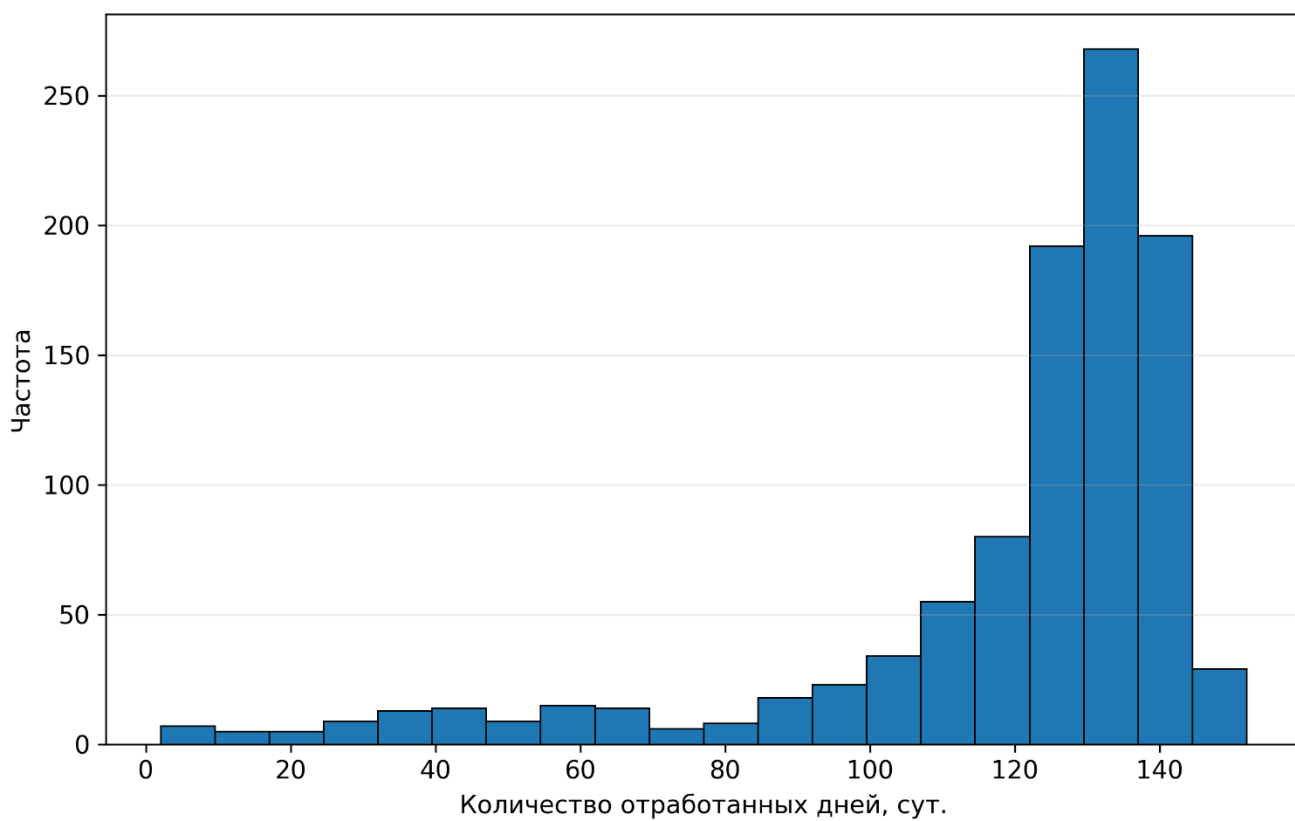


Рисунок Б.1. - Распределение количества отработанных дней

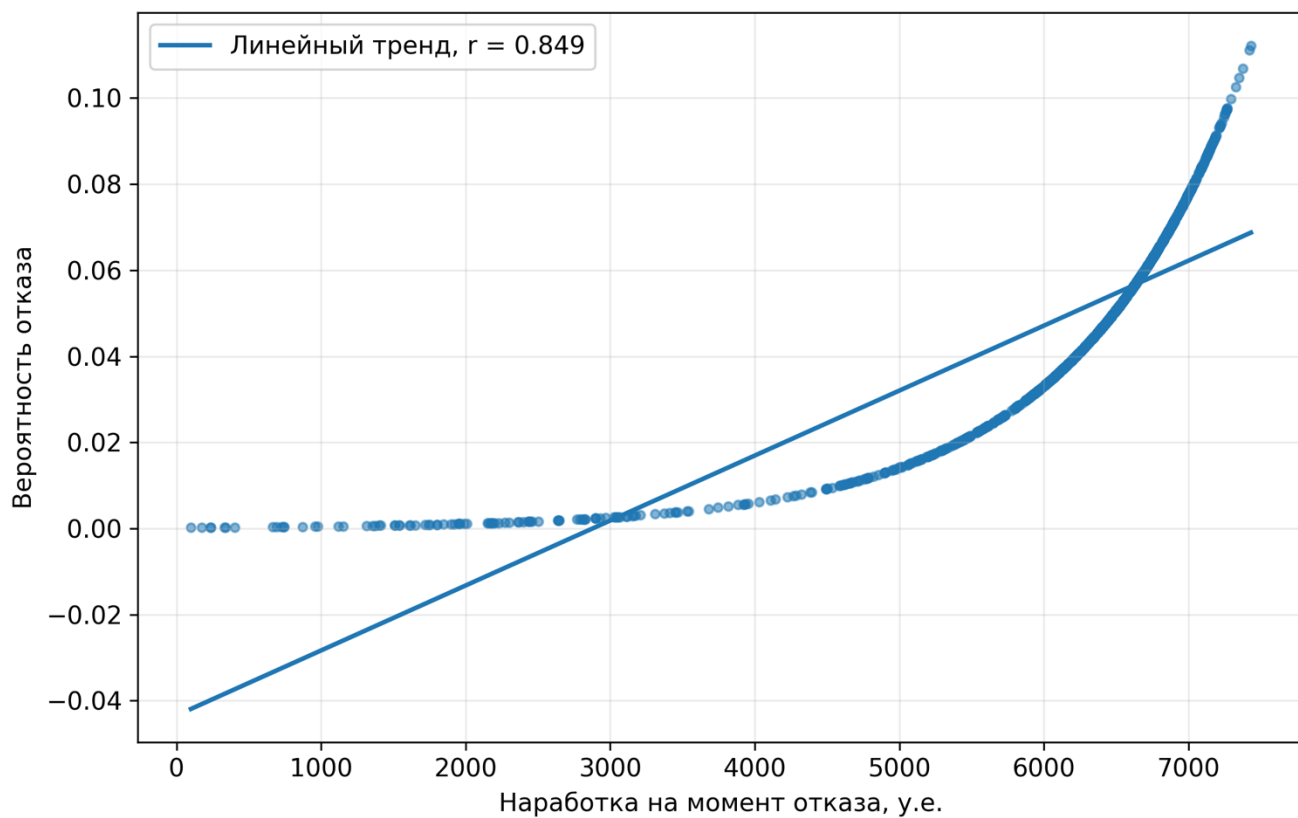


Рисунок Б.2. - Зависимость вероятности отказа от наработки

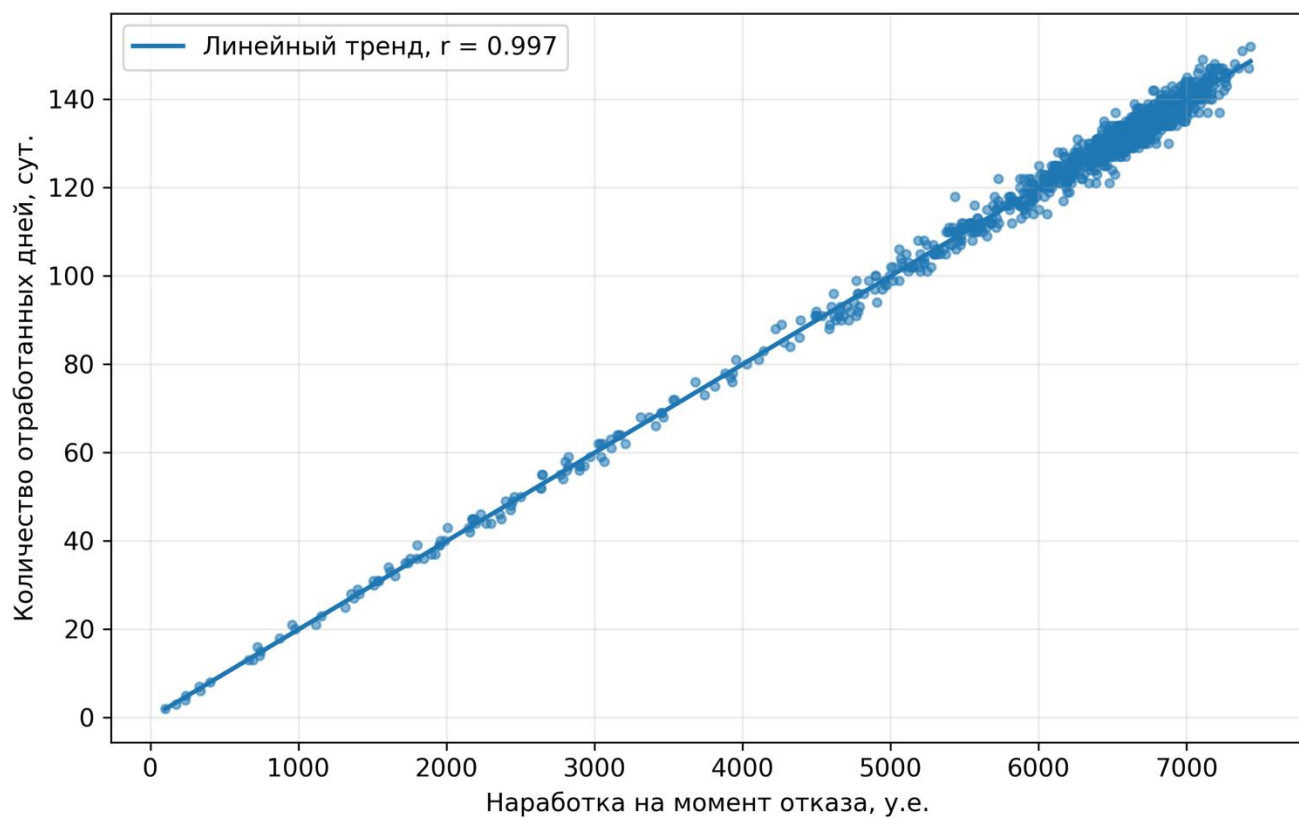


Рисунок Б.3. - Зависимость количества отработанных дней от наработки

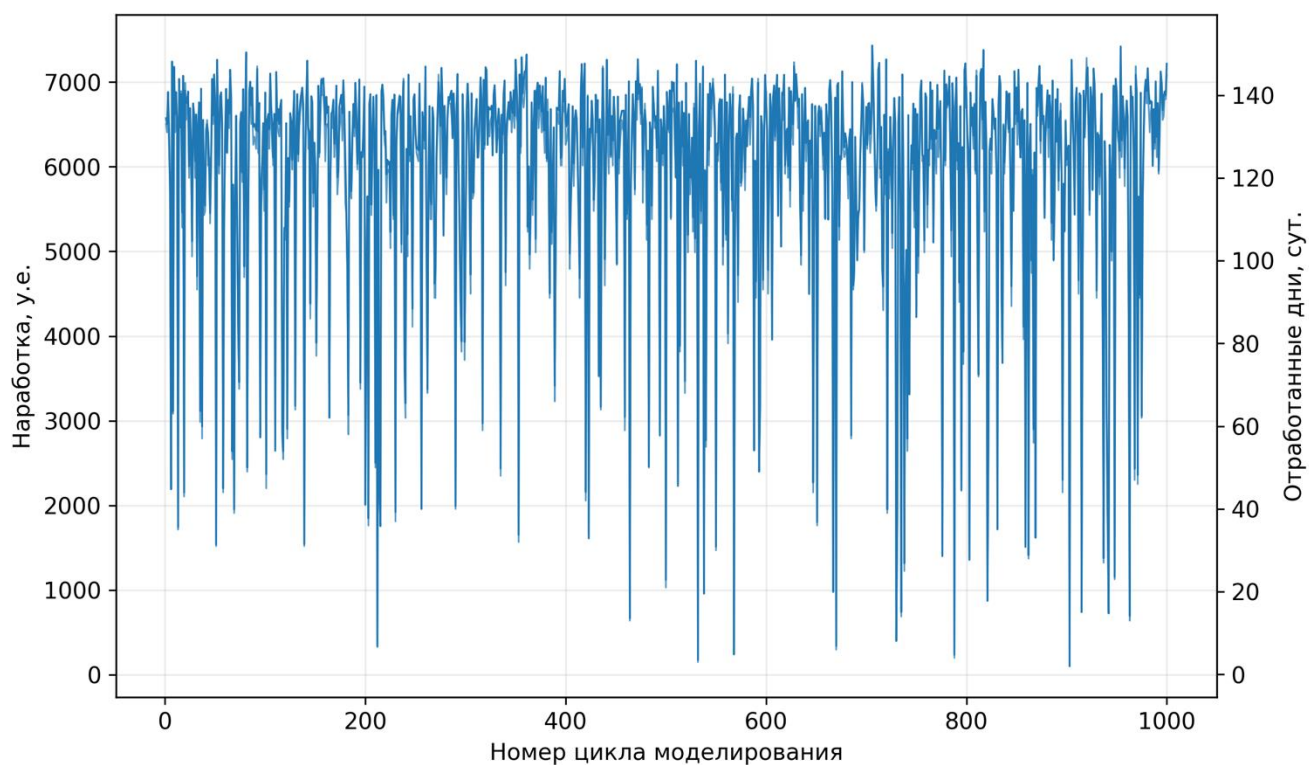


Рисунок Б.4. - Динамика результатов моделирования по 1000 циклам

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор - проректор по образовательной деятельности федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»



И.А. Артемьев

2025 г.

**СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ
результатов диссертационного исследования
в учебный процесс**

Основные положения и методические разработки диссертационного исследования Арифиллина Ильи Владимировича на тему «Научные основы комплексного обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники в аэропортах», представленного на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.9.5 – Эксплуатация автомобильного транспорта, внедрены в учебный процесс федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)».

Результаты диссертационной работы были использованы в процессе разработки рабочих программ учебных дисциплин по образовательной программе подготовки «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» (направление подготовки 23.03.03) и «Таможенное дело» (специальность 38.05.02), а также при преподавании дисциплин в учебном процессе при чтении курса «Построение информационных систем на автомобильном транспорте», «Силовые агрегаты», «Транспортная телематика», «Интеллектуальные транспортные системы».

Заведующий кафедрой «Транспортная телематика»

В.М. Власов

Подпись Власова В.М. заверяю:

Подпись Власова В.М. удостоверяю
документовед о/к Иванова И.И.





МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет»
(СПбГАСУ)

ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, 190005

№ _____

[Акт внедрения материалов диссертации]
в учебный процесс СПбГАСУ



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор по образовательной
деятельности
ФГБОУ ВО СПбГАСУ

Михайлов С.В.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

материалов, содержащихся в диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук «Научные основы комплексного обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники в аэропортах» Арифиллина Ильи Владимировича, в учебный процесс Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета

Комиссия в составе:

Председателя: кандидата технических наук, доцента Зазыкина А.В. – декана автомобильно-дорожного факультета.

Членов комиссии:

доктора технических наук, профессора Евтюкова С.С. – заведующего кафедрой транспортных систем и дорожно-мостового строительства;

доктора технических наук, доцента Куракиной Е.В. – заведующего кафедрой наземных транспортно-технологических машин;

кандидата технических наук, доцента Черняева И.О. – заведующего кафедрой технической эксплуатации транспортных средств.

Настоящим подтверждает внедрение материалов, содержащихся в диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук «Научные основы комплексного обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники в аэропортах» директора института общинженерной подготовки ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)» (научный консультант: доктор технических наук, профессор Евтюков С.А.), в учебный процесс выпускающей кафедры транспортных систем и дорожно-мостового строительства автомобильно-дорожного факультета для обучающихся по направлению подготовки 23.03.01 «Технология транспортных процессов».

Результаты диссертационного исследования нашли теоретическое и практическое применение в учебном процессе по направлению подготовки 23.03.01 «Технология транспортных процессов» в следующих дисциплинах учебного плана:

- Б1.В.08 Безопасность дорожного движения;
- Б1.О.28 Интеллектуальные транспортные системы;
- Б1.О.30 Анализ транспортной деятельности предприятия.

Внедрение результатов диссертации Арифиллина Ильи Владимировича обсуждено на заседании учебно-методической комиссии автомобильно-дорожного факультета Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета «08» апреля 2026 г., протокол № 4.

Основные положения диссертации «Научные основы комплексного обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники в аэропортах», используемые в учебном процессе, изложены в следующих печатных трудах автора:

1. Арифиллин, И.В. Организация поставок запасных частей для специальных автомобилей, эксплуатируемых в аэропортах/И.В. Арифиллин // Монография. – 2025, Москва, Типография «Продвижение». – С.167
2. Арифиллин, И.В. Структура методов, применяемых для снятия неопределенности в информационных ситуациях, характерных для грузовых автомобильных перевозок /И.В. Арифиллин, О.В. Малихина // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2025. - № 1 (80). – С.81-92.
3. Арифиллин, И.В. Комплексная ИТС технического обслуживания и обеспечения материально-технического снабжения специальных автомобилей, эксплуатируемых в аэропортах /И.В. Арифиллин // Мир транспорта и технологических машин – 2025. – № 1-4 (88). – С.31-36.
4. Арифиллин, И.В. Метод оценки эффективности автотранспортных предприятий, осуществляющих контейнерные автомобильные перевозки / И.В. Арифиллин, С.С. Евтюков, А.А. Носков// Транспортное дело России – 2025. - № 2. – С.273-277.
5. Арифиллин, И.В. Методология оценки системной эффективности грузовых контейнерных автомобильных перевозок/ И.В.Арифиллин, С.А. Евтюков, А.А. Носков // Транспортное дело России – 2025. - № 4. – С.110-113.

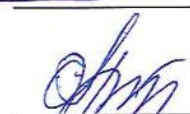
Председатель комиссии:
Декан АДФ, к.т.н., доцент

 Зазыкин А.В.

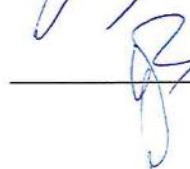
Члены комиссии:
Заведующий кафедрой ТС и ДМС,
д.т.н., профессор

 Евтюков С. С.

Заведующий кафедрой НТТМ,
д.т.н., доцент

 Куракина Е.В.

Заведующий кафедрой ТЭТС,
к.т.н., доцент

 Черняев И.О.



Разработка, производство
и ремонт авиационной техники

ЗАО «Универсал-Аэро»
Россия, 125363 г. Москва, Строительный проезд, дом 7
Тел./факс: +7 (499) 492-67-75, 492-67-81
e-mail: universal@asvt.ru; www.universal-aero.ru

АКТ

внедрения в практическое применение

результатов диссертационной работы к.т.н., доцента, директора института
общинженерной подготовки ФГБОУ ВО «МАДИ» Арифуллина Ильи Владимировича

на тему

«Научные основы комплексного обеспечения запасными частями специальной
автомобильной техники в аэропортах»

Настоящим Актом подтверждаем, что результаты диссертационной работы Арифуллина Ильи Владимировича «Научные основы комплексного обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники в аэропортах» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.9.5. «Эксплуатация автомобильного транспорта» внедрены ЗАО «Универсал – Аэро» в процессы взаимодействия с эксплуатационными службами аэропортов Российской Федерации.

ЗАО «Универсал – Аэро» обеспечило сравнение в практической деятельности, разработанной Арифуллиным И.В. методики с двумя иными стратегиями снабжения запасными частями аэропортов московского авиационного узла. Представленная в диссертационном исследовании методика доказала, что при использовании моделирования с вероятностью в 0,722 общие расходы, связанные со срочным ремонтом после отказа узла специальной автомобильной техники ниже, чем при использовании альтернативных способов снабжения.

Кроме того, определенные Арифуллиным И.В. характеристики и номенклатура существующего парка наземной техники аэропортов, позволили предприятию применить показатели, необходимые для формирования специализированной базы данных запасных частей специальной автомобильной техники для дальнейшего её использования в имитационном моделировании прогноза необходимых сроков поставки запасных частей специальной автомобильной техники аэропортов.

Генеральный директор
ЗАО «Универсал – Аэро»
Лауреат премии Правительства РФ
в области науки и техники




15.08.2025

М.М. Стыскин

АКТ

**об использовании результатов диссертационной работы на тему
«Научные основы комплексного обеспечения запасными частями
специальной автомобильной техники в аэропортах», выполненной
Арифиллиным И.В.**

Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационной работы Арифиллина Ильи Владимировича «Научные основы комплексного обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники в аэропортах» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.9.5. «Эксплуатация автомобильного транспорта» внедрены в ООО «РСЦ» в производственную деятельность.

ООО «РСЦ» применило разработанные Арифиллиным И.В. требования к интеграции системы моделирования наработки узлов и агрегатов специальной автомобильной техники для предупреждения отказов и планирования ремонта. На практике 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, характеристики поставщиков, качества приобретаемых деталей, управление ресурсами склада или интеграция алгоритма в уже существующие системы управления поставками, техническим состоянием автопарка специальной автомобильной техники. Доказана работоспособность модели вероятностного прогноза времени отказа и ресурса запасных частей с учётом статистического анализа работы соответствующих предприятий – эксплуатантов техники.

Генеральный директор ООО «РСЦ»,
Доктор технических наук
19.08.2025



А.Г. Савельев

ООО «МИЛАРИН»

198320, город Санкт-Петербург, город Красное Село, улица Свободы, 63, литер А
ИНН 7805120198, КПП 780701001, ОГРН 10377811051101
Тел/Факс (812)741-15-72, e-mail: melarin@melarin.ru

Исх. №222/1
от 25.08.2025

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования

Арифуллина Ильи Владимировича

на тему

«Научные основы комплексного обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники в аэропортах»

Подтверждаем, что результаты диссертационной работы Арифуллина Ильи Владимировича «Научные основы комплексного обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники в аэропортах» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.9.5. «Эксплуатация автомобильного транспорта» внедрены ООО «Миларин» в процессы организации перевозок предприятия, а именно:

1. Разработанное автором программное обеспечение, которое позволяет оптимизировать временные затраты на коммуникацию между заказчиком, поставщиком и транспортной компанией, а также определить оптимальные сроки снабжения заказчиков;
2. На практике применена разработанная Арифуллиным И.В. стратегия комплексной методологии обеспечения эксплуатантов различного вида техники, основанная на определении экономической эффективности и использовании аналитических инструментов имитационного моделирования. Данная стратегия показала значительную эффективность и в 90% случаев заказов удалось снизить общие затраты предприятия.

Также в практической деятельности ООО «Миларин» используются следующие публикации Арифуллина И.В.:

1. 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.
2. 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.

Генеральный директор ООО «Миларин»

 А.Б. Носков




ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ВОСТОК

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

«Технический центр «Восток»

188686, Ленинградская область, Всеволожский район,
Промзона Коммунально-складская зона Коркинская,

Проезд 1, д. 1, тел.: +7 (812) 490-7777

ИНН 4703081890 КПП 470301001 ОГРН 1054700108390 ОКПО 79830466

р/с 40702810237000007239 в Филиале ОПЕРУ Банка ВТБ (ПАО) в г. Санкт-Петербурге
к/с 30101810200000000704 БИК 044030704

20 августа 2025 года

АКТ

внедрения в практическое применение

результатов диссертационной работы к.т.н., доцента МАДИ Арифиллина Ильи Владимировича на тему «Научные основы комплексного обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники в аэропортах»

Настоящим Актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Арифиллина Ильи Владимировича «Научные основы комплексного обеспечения запасными частями специальной автомобильной техники в аэропортах» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.9.5. «Эксплуатация автомобильного транспорта» внедрены ООО «Технический центр «Восток» в процессы заказа запасных частей и сервисного обслуживания специальной автомобильной техники.

При практическом применении в ООО «Технический центр «Восток» в экспертных исследованиях были использованы научно-методические разработки Арифиллина И.В., в частности алгоритм определения оптимальных сроков снабжения запасными частями предприятия для технического обслуживания и ремонта специальной автомобильной техники. Разработанный алгоритм позволил минимизировать сроки сервисного обслуживания и снизить экономические издержки предприятия более чем на 20%. На основе проведенного Арифиллиным И.В. комплексного анализа вероятностной сущности отказов и работы системы снабжения запасными частями сформирована модель вероятностного прогноза времени отказа и ресурса запасных частей с учетом статистического анализа условий эксплуатации техники за последние несколько лет.

Также в практической деятельности ООО «Технический центр «Восток» используются следующие публикации Арифиллина И.В.:

1. Арифиллин, И.В. Анализ факторов влияния внешней среды на сроки эксплуатации автомобилей /И.В. Арифиллин, А.В. Терентьев// Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2019. - № 1. – С.47-50.
2. Арифиллин, И.В. Комплексная оценка качества доставки запасных частей для технического обслуживания автотранспортного парка / И.В. Арифиллин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). - 2016. - № 2(45). - С.37-41.
3. Арифиллин, И.В. Система управления качеством эксплуатации автомобиля /И.В. Арифиллин, М.Ю. Карелина, А.В. Терентьев// Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2019. - № 2(57). – С.34-42.

Генеральный директор ООО «Технический центр «Восток»



Р.А. Герцев