

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ»

На правах рукописи

ГОЛОВЧЕНКО Глеб Валентинович

**МЕТОДЫ РЕСУРСНО-ВРЕМЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА
ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ АЭРОПОРТОМ В СБОЙНЫХ
СИТУАЦИЯХ**

05.22.14 Эксплуатация воздушного транспорта

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Далингер Яков Михайлович

Санкт-Петербург – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Глава 1. АНАЛИЗ НАРУШЕНИЙ РЕГУЛЯРНОСТИ ОТПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ И СОСТОЯНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ АЭРОПОРТОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ.....	16
1.1. Анализ нарушений регулярности отправления воздушных судов, приводящих к сбойным ситуациям, и их влияния на показатели эффективности аэропорта	16
1.2. Динамика и тренд статистических показателей регулярности отправления воздушных судов.....	25
1.3. Концептуальный анализ процессов координации и взаимодействия служб аэропорта и других субъектов при нарушении регулярности полетов и в сбойных ситуациях.....	31
1.4. Анализ состояния автоматизации процессов оперативного управления аэропортом.....	37
1.5. Автоматизация процессов оперативного управления аэропортовой деятельностью на базе АС «КОБРА-2».....	46
Выводы по главе 1.....	55
Глава 2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РЕСУРСНО-ВРЕМЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОЧЕРЕДНОСТЬЮ ОТПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ И РАБОТОЙ БРИГАД В СБОЙНОЙ СИТУАЦИИ АЭРОПОРТА	56
2.1. Диаграмма ресурсно-временной оптимизации процесса оперативного управления аэропортом в сбойной ситуации.....	56
2.2. Алгоритм определения очередности отправления воздушных судов в сбойных ситуациях аэропорта.....	58

2.3. Общие принципы разработки аналитического метода ресурсно-временной оптимизации очередности подготовки воздушных судов к отправлению при открытии аэропорта.....	60
2.4. Постановка задачи ресурсно-временной оптимизации очередности подготовки воздушных судов к отправлению при открытии аэропорта.....	63
2.5. Формулирование задачи ресурсно-временной оптимизации очередности самолетовылетов при выходе из сбойной ситуации аэропорта в виде задачи целочисленного программирования.....	64
2.6. Выбор и адаптация метода последовательного поиска с горизонтом просмотра для решения оптимизационной задачи.....	67
2.7. Постановка и решение задачи ресурсно-временной оптимизации графиков работы бригад по обслуживанию воздушных судов при заданной очередности отправок в сбойной ситуации аэропорта.....	77
Выводы по главе 2.....	81
Глава 3. АВТОМАТИЗАЦИЯ РЕСУРСНО-ВРЕМЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОЧЕРЕДНОСТЬЮ ОТПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ И ГРАФИКОВ РАБОТОЙ БРИГАД В СБОЙНОЙ СИТУАЦИИ АЭРОПОРТА.....	83
3.1. Вычислительная среда для разработки модулей автоматизации ресурсно-временной оптимизации.....	83
3.2. Организация информационного обеспечения и расчетов исходных данных в модулях автоматизации ресурсно-временной оптимизации.....	84
3.3. Автоматизация расчета оптимальной очередности отправления воздушных судов на базе модуля «ССП-ССО».....	90
3.4. Автоматизация ресурсно-временной оптимизации графиков работы бригад на базе модуля «УР-ССО».....	91
3.5. Валидация ресурсно-временной оптимизации очередности подготовки воздушных судов к отправлению на модельном примере.....	93
3.6. Валидация ресурсно-временной оптимизации графиков работы бригад наземного обслуживания воздушных судов на модельном примере.....	98

3.7. Взаимодействие подсистем АС «КОБРА-2» с модулями ресурсно-временной оптимизации оперативного управления аэропортом в сбойной ситуации.....	102
Выводы по главе 3.....	103
Глава 4. ИМИТАЦИОННЫЙ МЕТОД РЕСУРСНО-ВРЕМЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ БРИГАД ПО ОБСЛУЖИВАНИЮ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ.....	104
4.1. Общие принципы и порядок разработки имитационного метода.....	104
4.2. Организация информационного обеспечения имитационной модели.....	106
4.3. Автоматизация расчёта сетевого графика работы бригад по наземному обслуживанию воздушных судов.....	112
4.4. Имитация распределений продолжительности выполнения операций сетевого графика и оценивание неизвестных параметров распределений.....	115
4.5. Автоматизация планирования процесса подготовки воздушных судов к вылету.....	121
4.6. Методика применения имитационной модели ресурсно-временной оптимизации процессов оперативного управления работой бригад по наземному обслуживанию воздушных судов.....	127
Выводы по главе 4.....	133
Заключение.....	134
Список сокращений.....	136
Список литературы.....	138
Приложение А. Листинги основных операторов имитационной модели.....	150

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В настоящее время роль воздушного транспорта значительно возросла, так как он является наиболее быстрым средством перемещения на большие расстояния. В транспортной системе России авиационные перевозки занимают ключевое место среди пассажирского транспорта. В последние годы (2013 - 2017 гг.) наблюдается значительно развитие гражданской авиации, характеризующееся стабильным ростом пассажирских авиаперевозок, строительством новых аэропортов, модернизацией и реконструкцией текущих аэропортов и другими факторами. Увеличение пассажирских перевозок приводит повышению интенсивности выполнения авиарейсов и сокращению времени наземного обслуживания. Многие авиакомпании, выполняющие полеты в отечественные аэропорты, предъявляют всё более жесткие требования по качеству и времени выполнения наземного обслуживания. Так авиакомпания «Победа» в 2017 году сократила время разворота до 25 минут в аэропорту «Бегишево». Всё это приводит к увеличению рисков возникновения сбойных ситуаций.

В работе над сбойной ситуацией понимается нарушение суточного плана полетов (СПП), при котором образуется массовое скопление пассажиров в аэропорту в двух основных случаях: закрытие аэропортов назначения, для которых аэропорт отправления является запасным, и прибытия в него рейсов «на запасной»; закрытие аэропорта на вылет и задержки рейсов. Нарушение СПП в свою очередь приводит к нарушению регулярности полетов, включающее в себя понятия регулярности отправления воздушных судов (ВС) гражданской авиации (ГА) и регулярности выполнения рейсов, а также характеризующее работу предприятий ГА и отрасли в целом по выполнению перевозок и других услуг воздушного транспорта (ВТ).

В представляемой работе исследуются проблемы и способы их разрешения при оперативном управлении (ОУ) в сбойной ситуации аэропорта (ССА). Существо проблем заключается в необходимости принятия

оперативных решений по ресурсно-временной оптимизации очередности обслуживания и отправок ВС в условиях ССА, что требует оперативной корректировки СПП, как документа, определяющего планы действий всех служб, связанных с предполетным технологическим обслуживанием ВС. Оперативность и оптимальность может быть обеспечена только применением соответствующих математических и имитационных моделей, и информационного обеспечения (ИО), охватывающего соответствующую информацию и информационные ресурсы.

Причинами сбойных ситуаций являются форс-мажорные обстоятельства (природные и общественные явления, другие случаи), которые возникают не по вине ни аэропорта, ни авиакомпании и которые невозможно предусмотреть или предотвратить, либо возможно предусмотреть, но невозможно предотвратить.

Важнейшей задачей становится задача сокращения времени на принятие управленческих решений, экономических и имиджевых потерь предприятий ВТ, а также социальных потерь авиапассажиров. Однако возникает существенное противоречие, связанное с рисками и наличием хорошо апробированных методов наземного обслуживания воздушных судов в различных ситуациях в аэропортах.

Степень разработанности темы исследования. Постановки задач и методы их решения в представляемой работе базируются на классических работах: математического моделирования и исследования операций (Р. Акоф, М. Sassieni N. Taha, Sh. M Ross, Ю.П. Зайченко и др.); теории графов и сетевых методов планирования (R. Basaker, A. Kofman, N. Kristofides, O. Ore, Sh. Ross, T. Saati, M. Swami, К.А Рыбников и др.); теории расписания (R. Bellman, Т.С. Hu, J.R. Jackson, S.M. Johnson, R.W. Coffman, E.G. Conway, C.R. Reeves, R.D. Smith, В.С. Танаев, В.В. Шкурба и др.); дискретного и стохастического программирования (Ю.М Ермолев, А.А. Корбут, Ю.Ю. Финкельштейн, Д.Б. Юдин и др.); статистического (имитационного) моделирования (Н.П. Бусленко, С.М. Ермаков, Г.А. Михайлов, А.В. Войтишек, R. Shannon и др.); теории вероятностей и ее инженерных приложениях (Е.С. Вентцель и др.).

Применительно к отраслевому применению по этой тематике заслуживают внимание широко известные работы авторов (А.М. Андронов, В.В. Андрианов, Васильев В.И., И.С. Голубев, Г.А. Крыжановский, В.Н.Лившиц, Р.В. Сакач, В.Г. Староселец А.Р. Яшкин и др.).

Заслуживают внимания исследования по разработке центрального расписания воздушных судов (ЦРДС), как единой основы для СПП всех аэропортов и организации планирования воздушного движения, проведенные в свое время учеными Центрального научно-исследовательского института автоматизированных систем управления гражданской авиации (ЦНИИАСУГА) под научным руководством Х.Б. Кордонского, а также работы I. Gertsbakh, В.М. Веневцева, М.С. Максима и др. Сложность разработки единого ЦРДС для всей страны намного превышает существующую практику составления РДС отдельных аэропортов на основе «свода» РДС авиакомпаний с учетом выделенных слотов. Аналогичные задачи не решались и не решаются больше нигде в мире.

Конкретные проблемы моделирования наземного обслуживания ВС, в том числе в штатной, нештатной и сбойной ситуации, в современной постановке исследовались в работах Ю.М. Чинючина, Е.В. Кониковой, В.А. Романенко, но только на имитационных моделях. В этих моделях не оптимизировались процессы ОУ аэропортом в сбойных ситуациях, а также не учитывалось ряд факторов: очередность обслуживания ВС в зависимости от их местоположения на перроне; возможность имплементации в моделях оперативной информации о состоянии ресурсов от автоматизированных и информационных систем (АС и ИС) оперативного управления процессами в аэропорту. Кроме того, не осуществлялась постановка задач в аналитической форме, решение которых математическими методами существенно сокращает затраты машинного времени, что очень важно на практике при оперативном управлении аэропортом в условиях дефицита времени.

Практическая реализация процессов ОУ технологического обслуживания ВС в аэропортах (без оптимизационных модулей оперативного управления в

сбойных ситуациях) достаточно представлена в АС и ИС, таких как разработанная под руководством и при непосредственном участии диссертанта АС «Комплексное обслуживание рейсов в аэропорту» (АС «КОБРА-2»), зарубежных ERP (Enterprise Resource Planning – планирование ресурсов предприятия) на основе ERP-стратегий и ERP-систем.

Современные требования, предъявляемые авиакомпаниями к аэропортам, недостаточно учтены в работах ученых. В связи с этим текущее методологическое обеспечение не позволяет решать практические задачи наземного обслуживания воздушных судов в сбойных ситуациях в аэропорту.

Объектом исследования является аэропорт (главный оператор) в состоянии сбойной ситуации.

Предметом исследования являются методы ресурсно-временной оптимизации процесса ОУ аэропортом в сбойных ситуациях.

Целью диссертационного исследования является сокращение комплексных потерь в процессе выхода аэропорта из сбойной ситуации, за счет разработки модели и модифицированных методов ресурсно-временной оптимизации.

Необходимость разрешения выявленного противоречия в соответствии с целью, объектом и предметом исследования обусловила постановку задачи автором и подход к ее разрешению, что подтверждает существенное значение для системы воздушного транспорта РФ.

Задача, решаемая в диссертации, - разработка методов ресурсно-временной оптимизации процесса ОУ аэропортом в сбойных ситуациях, основанных на совместном или отдельном использовании разработанных аналитических и имитационной моделей, и их практической реализации в составе типовых подсистем АС «КОБРА-2».

Для достижения цели в работе проведены исследования в следующих направлениях:

- выявление приоритетов развития функционального и информационного обеспечения автоматизации процессов ОУ аэропортом, в том числе в сбойной ситуации, учесть их при глубокой модернизации АС «КОБРА»

в АС «КОБРА-2» и обеспечить массовое внедрение ее типовых проектных решений в отечественных и зарубежных аэропортах;

- анализ динамики и тренда показателей регулярности отправок ВС и ее нарушений для аэропортов различных классов;

- разработка эвристического метода установления очередности вылета ВС при выходе из ССА;

- разработка аналитического метода, базирующегося на постановке, решении и автоматизированной реализации аналитических моделей ресурсно-временной оптимизации очередности отправления ВС и графиков работы бригад по ТО при ОУ аэропортом в сбойной ситуации, учитывающей не только состояние ресурсов аэропорта, которые меняются во времени, но и местоположение ВС на перроне;

- разработка имитационного метода, базирующегося на имитационной модели ресурсно-временной оптимизации графика работ бригад по ТО ВС при ОУ аэропортом и методики ее применения;

- разработка средств информационного обеспечения и автоматизировать процессы ОУ аэропортом в сбойной ситуации на базе разработанных аналитических и имитационной моделей в составе соответствующих модулей типовых подсистем АС «КОБРА-2».

Методология исследования базируется на комплексном подходе при решении поставленных задач с использованием разработанных диссертантом:

- новых эвристической и математической моделей установления очередности вылетов ВС при выходе аэропорта из сбойной ситуации;

- новой математической модели ресурсно-временного распределения динамических и статических ресурсов аэропорта для обслуживания ВС в расчетной очередности их вылета;

- новой имитационной модели процессов ОУ аэропортом в стационарных и сбойных ситуациях.

Решение поставленных задач базируется на фундаментальных работах отечественных и зарубежных специалистов в области эксплуатации ВТ, теории исследования операций и имитационного моделирования.

Информационную и статистическую базу исследования составляют:

- отраслевые нормативно-правовые документы и отраслевая нормативно-справочная информация (НСИ) по слотам, РДС и ТО ВС;
- результаты анкетного обследования IT-руководителей аэропортов;
- статистические сведения о выполнении расписания (плана) отправок ВС из начального и промежуточных пунктов рейса (независимо от принадлежности ВС) формы федерального государственного статистического наблюдения 30-ГА;
- НСИ АС «КОБРА-2».

Научная новизна работы состоит в следующем:

- проведенный концептуальный анализ процессов взаимодействия служб аэропорта и развития IT аэропортов в целом позволил сформулировать задачу необходимости разработки метода ресурсно-временной оптимизации очередности отправления ВС и графиков работы бригад по ТО при ОУ аэропортом в сбойной ситуации;
- впервые поставлена задача и разработаны новые аналитические модели ресурсно-временной оптимизации очередности отправления и графиков работы бригад по техническому обслуживанию ВС при ОУ в ССА, учитывающая не только состояние меняющихся во времени ресурсов, но и местоположение ВС на перроне;
- разработана новая имитационная модель ресурсно-временной оптимизации графика работ бригад ТО ВС при заданной очередности отправления ВС при ОУ аэропортом в штатной и сбойной ситуациях, отличающаяся от известных моделей использованием и вычислительной среды Mathcad, упрощающей модификацию критериев эффективности, исходных условий и алгоритмов моделирования.

- разработанные модель и методы доведены до программной реализации в АС «КОБРА-2», что позволяет автоматизировать процессы оперативного управления аэропортовой деятельностью.

Теоретическая значимость работы. Результаты исследования позволяют:

- применять по выбору главного оператора (оператора) новые аналитические и имитационные методы при ресурсно-временной оптимизации ОУ в ССА;

- осуществлять ресурсно-временную оптимизацию очередности отправления ВС и графиков работы бригад по ТО при ОУ выходом из ССА, учетом не только состояния меняющихся во времени ресурсов аэропорта, но и местоположения ВС на перроне.

Практическая значимость работы заключается в предоставлении органам ОУ главных операторов нового информационно-технологического инструментария для автоматизации процессов ОУ аэропортом в штатных и сбойных ситуациях на базе АС «КОБРА-2». Использование разработанного метода ресурсно-временной оптимизации ОУ ресурсами в ССА при установлении очередности вылета ВС и корректировке графиков работы бригад по ТО повышает эффективность эксплуатации аэропортов и оптимизирует потребное количество их динамических ресурсов.

Практические результаты исследования представляют:

- комплекс информационных средств и информационных технологий АС «КОБРА-2», разработанный под руководством диссертанта в РИВЦ-Пулково, с дополнительными модулями ОУ выхода из ССА, что отражено в актах внедрения РИВЦ-Пулково, аэропортов Абакан и Сургут;

- рекомендация по необходимости существенной переработки формы федерального статистического наблюдения 30-ГА, так как в ней не детализируются других причин и показателей нарушения регулярности выполнения рейсов, кроме метеоусловий и отсутствия ГСМ;

- методика применения имитационной модели ресурсно-временной оптимизации ОУ ресурсами аэропорта в сбойной ситуации при внедрении и эксплуатации АС «КОБРА-2», утвержденная РИВЦ-Пудково;

- материалы, включающие результаты исследований и отраженные в учебном пособии УМО по образованию в области аэронавигации.

Достоверность обеспечивается корректностью применения апробированных научных методов решения оптимизационных задач целочисленного программирования, и подтверждается положительными отзывами специалистов при обсуждении работы на научно-технических, в том числе и международных, симпозиумах и конференциях; экспертизой публикаций, отражающих основное содержание диссертации, в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях; высокой сходимостью экспериментальных данных, полученных в ходе испытаний соответствующих модулей автоматизации процессов ОУ выходом из ССА в АС «КОБРА-2», с данными, полученными в результате имитационного моделирования.

Обоснованность научных результатов и положений, сформулированных в диссертации и выдвинутых на защиту, обеспечивается: научной аргументированностью исходных теоретических положений; последовательным применением принципов выявления, анализа и принятия решений при проведении исследований; корректным выбором исходных данных, основных допущений и ограничений при формулировании постановок научных задач; результатами, полученными при имитационном моделировании.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод установления очередности отправления ВС при выходе из сбойных ситуаций, не использовавшийся ранее, является наиболее приемлемым для региональных аэропортов с невысоким уровнем автоматизации процессов оперативного управления.

2. Разработанная двухуровневая аналитическая модель ресурсно-временной оптимизации очередности отправления ВС и графиков работы

бригад по наземному обслуживанию ВС при оперативном управлении аэропортом в сбойной ситуации позволяет аэропорту решать каждую из задач как в комплексе, так и по отдельности, исходя из практических задач и особенностей функционирования аэропорта.

3. Реализованные модули и средства информационного обеспечения АС «КОБРА-2», автоматизирующие расчеты ресурсно-временной оптимизации процессов оперативного управления на базе аналитических моделей сокращают среднее время обслуживания ВС в штатной и сбойной ситуации в аэропорту.

4. Разработанная имитационная модель и методика ее применения при ресурсно-временной оптимизации графика работ бригад по наземному обслуживанию ВС при заданной очередности отправления ВС в штатной и сбойной ситуации аэропорта впервые учитывает местоположения ВС на перроне и суточную динамику состояния ресурсов аэропорта.

Соответствие содержания диссертации требованиям специальности 05.22.14 «Эксплуатация воздушного транспорта». Содержанием диссертации является комплекс проблем и задач повышения эффективности оперативного управления аэропортом, что соответствует содержанию специальности.

Объектом исследования являются аэропорты, занятые технологическим обслуживанием ВС в сбойной ситуации, что соответствует формуле специальности.

Содержание диссертации отвечает следующим областям исследований:

- п.4. Системный анализ и управление процессами эксплуатации объектов ВТ;
- п.7. Совершенствование методов и средств управления и планирования, повышения эффективности деятельности авиапредприятий, механизации и автоматизации процессов эксплуатации ВТ;
- п.16. Разработка методов и средств информационного обеспечения процессов управления эксплуатацией авиационной техники.

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования докладывались на следующих конференциях, что подтверждено документами их организаторов:

- «Авиационный IT форум 2015. 8-я ежегодная международная конференция» (организатор АТО-Events), Москва, 21.05.2015.
- «Авиационный IT-форум России и СНГ - 2015» (организатор «Центр стратегических разработок в гражданской авиации»), Москва, 10.12.2015-11.12.2015.
- 48-я московская международная конференция Ассоциации «Аэропорт» - «Эффективное управление наземным обслуживанием в аэропортах», Москва, 17.12.2015.
- «КОБРА-2016. Опыт использования инновационных ИТ – решений в деятельности аэропортов» (организатор «РИВЦ-Пулково»), Сочи, 12.05.2016.
- 50-я московская международная конференция Ассоциации «Аэропорт» - «Поиск новых подходов к развитию аэропортового бизнеса», Москва, 26.10.2016.
- 52-я московская международная конференция Ассоциации «Аэропорт» - «Стратегия эффективного управления аэропортами», Москва, 25.10.2017.
- «Наземное обслуживание в аэропортах-2017. 8-я международная выставка и конференция» (организатор АТО-Events), Москва, 27.09.2017.
- «Международный инновационный форум пассажирского транспорта SmartTRANSPORT 2017» (организатор Комитет по транспорту Санкт-Петербурга), Санкт-Петербург, 18.10.2017.
- «Взгляд в будущее» (организатор АТО-Events), Москва, 11.04.2018.

Внедрение результатов работы. Подсистема «СПП» АС «КОБРА-2» с модулем «ССЭ», реализующим эвристический алгоритм выхода из ССА, внедрена в 20-и аэропортах и 2-х авиакомпаниях (Акт «РИВЦ-Пулково»). Модули «ССО», реализующие аналитическую и имитационную модели ресурсно-временной оптимизации ОУ в ССА включены в проектную документацию АС «КОБРА-2» и внедрены в аэропортах «Абакан» и «Сургут» (Акты «РИВЦ-Пулково», аэропортов «Абакан» и «Сургут»). Внедрение

модулей позволяет сократить среднее время обслуживания ВС в указанных аэропортах в штатной ситуации на 16%, а в сбойной ситуации на 29%.

Публикации. По результатам исследования опубликовано 17 печатных работах, в том числе: в изданиях по списку ВАК – 9; в издании, рецензируемом экспертами УМО – 1 учебное пособие; в других изданиях – 7.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка сокращений, списка литературы из 122 наименований, 1-го приложения с листингом имитационной модели в вычислительной среде Matchad. Диссертация содержит 156 страниц с 27 рисунками, 28 таблицами.

Глава 1. АНАЛИЗ НАРУШЕНИЙ РЕГУЛЯРНОСТИ ОТПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ И СОСТОЯНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ АЭРОПОРТОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ

1.1. Анализ нарушений регулярности отправления ВС, приводящих к сбойным ситуациям, и их влияния на показатели эффективности аэропорта

Аэропорт – комплекс сооружений, включающий в себя аэродром, аэровокзал, другие сооружения, предназначенный для приема и отправки воздушных судов (ВС), обслуживания воздушных перевозок и имеющий для этих целей необходимые оборудование, авиационный персонал и других работников [4]. Основные функции производственной деятельности аэропорта, сгруппированные по компонентам обслуживания, определены в руководстве ICAO (International Civil Aviation Organization) [3].

Основные функции производственной деятельности аэропорта, применительно к российской практике, раскрыты в руководящем документе [9] и детализированы в учебном пособии диссертанта [37].

Хозяйствующим субъектом, осуществляющим аэропортовую деятельность в соответствии с Правилами обеспечения доступа к услугам субъектов естественных монополий в аэропортах [6], является главный оператор (оператор), имеющий и (или) использующий на любом законном основании комплекс сооружений, включающий в себя аэродром, и (или) аэровокзал, и (или) другие объекты инфраструктуры аэропорта, предназначенные для оказания комплекса или части услуг в аэропорту. Требования к операторам аэродромов определены Приказом Минтранса РФ от 25 сентября 2015 г. N 286 [8].

Объектами инфраструктуры аэропорта являются сооружения и оборудование, производственно-технологические комплексы, находящиеся на

территории аэропорта и непосредственно используемые в целях оказания потребителям услуг в аэропорту. Объекты, средства и персонал образуют ресурсы, подразделяемые на статические (не перемещающиеся) и динамические (перемещающиеся, включающие персонал) ресурсы, эффективность использования которых является одной из основных задач оперативного управления работой аэропорта.

Ключевые показатели эффективности производственной деятельности аэропорта (АП) – безопасность и регулярность полетов, качество обслуживания клиентов, производительность и рентабельность [14]. Эти показатели – основа, учитываемая при разработке расписания движения воздушных судов (РДС). Разработка РДС – сложнейшая задача, особенно когда эта разработка велась для всей отечественной ГА на территории всей страны с декомпозицией по управлениям ГА, авиаотрядам, аэропортам. Учитывая маломощность существующих в то время компьютеров, ученые ЦНИИАСУГА в тесной связи с практиками ГА проявляли верх научной изобретательности для математических постановок задач и вычислительных способов их решения, опираясь на методы декомпозиции, эвристики и машинного эксперимента [24, 57, 58, 72, 98-101, 115]. Заметим, что задача составления РДС, как единого РДС для страны, ставилась и решалась только в СССР и больше ни в одной стране мира. В настоящее время задача составления РДС в формальном плане изначально не ставится как задача составления единого всероссийского РДС [72]. Формализация и оптимизация РДС осуществляется на уровне авиакомпаний и аэропортов, что существенно снижает уровень сложности оптимизационных задач, тем не менее, не делая их простыми.

Регулярность полётов характеризует работу авиапредприятий и территориальных управлений гражданской авиации (ТУГА), отрасли в целом по доставке пассажиров, багажа и грузов в соответствии с договором на перевозку. Регулярность полётов ВС ГА характеризуется двумя составляющими: регулярность отправок ВС и регулярность выполнения рейсов [14, 68].

Регулярность отправления ВС определяется в процентах, как отношение регулярных отправок ВС к общему количеству отправок ВС, предусмотренных расписанием (планами полетов), где задержкой отправления ВС считается отправление ВС из аэропорта позже времени, установленного расписанием (планом полетов). Регулярность выполнения полетов также оценивается по параметрам: посадка рейсов; прибытие рейсов; отправление рейсов; вылет рейсов.

Отправление считается регулярным, если:

- взлет ВС произведен не позднее расчетного времени взлета;
- взлет ВС произведен позднее расчетного времени, но в первый пункт посадки по маршруту полета ВС прибыло во время, установленное расписанием (планом полета).

Регулярность отправления ВС тесно связана с работой аэропортов, состояние которой *определяется следующими ситуациями* [14, 45, 86, 87]:

- штатная ситуация;
- нештатная ситуация;
- сбойная ситуация.

Штатная ситуация – нормальная работа аэропорта и всех его служб в точном соответствии с суточным планом полетов (СПП), разрабатываемого на основе утвержденного РДС.

Нештатная ситуация – работа аэропорта с отклонениями от СПП, вызываемая нехваткой ресурсов и/или внесением в СПП непредусмотренных рейсов. Нештатная ситуация не приводит к остановке работы аэропорта по отправлениям ВС, но требует внесения оперативных корректировок и повышенного уровня контроля деятельности всех служб аэропорта с целью обеспечения максимально возможного соответствия СПП.

Сбойная ситуация в аэропорту (ССА) – это нарушение СПП, при котором образуется массовое скопление пассажиров в аэропорту. ССА является следствием двух вариантов развития событий: закрытие аэропортов назначения, для которых аэропорт отправления является запасным, и прибытия

в него рейсов «на запасной»; закрытие аэропорта на вылет и задержки рейсов. С позиции авиакомпаний сбойной является ситуация, вызвавшая незапланированное ухудшение условий перевозки пассажира по отношению к принятым авиакомпанией обязательствам по обеспечению всех качественных характеристик предоставляемой ей услуги.

Причинами сбойных ситуаций являются форс-мажорные обстоятельства – различные случаи, возникающие не по вине ни аэропорта, ни авиакомпании, и которые невозможно предвидеть заранее. К таким обстоятельствам относят, например:

- природные явления или иные обстоятельства, которые невозможно предусмотреть или предотвратить, либо возможно предусмотреть, но невозможно предотвратить, например, метеоусловия (грозовая деятельность, сильные ливневые осадки, повышенная электрическая активность атмосферы, сдвига ветра, бури и др.), сложная орнитологическая обстановка и др.;
- общественные явления (народные волнения, забастовки и др.);
- террористические акты;
- временные режимы (в т.ч. время официальных церемоний встречи и проводов);
- технические причины;
- отсутствие свободных мест стоянок, инциденты на перроне и др.

В частных случаях ССА могут также обуславливаться недостатками в координации деятельности участвующих в разрешении ССА служб и подразделений, системными недостатками в деятельности подразделений, недостаточной эффективностью применения существующих процедур и т.д.

Оперативные плановые мероприятия по выходу из ССА в первую очередь связаны с корректировкой СПП и порядком наземного обслуживания (НО) ВС.

Виды нарушений регулярности полетов ВС и субъекты, виновные в этих нарушениях, установлены классификатором нарушений регулярности полетов ВС ГА [2, 3, 14, 15, 68-71]. Выделим из этого классификатора наиболее значимые причины, влияющие на возникновение сбойных ситуаций в

аэропорту в целом по вине различных субъектов – аэропорта, авиаперевозчиков и др. (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Выборка из классификатора нарушений регулярности полетов ВС ГА значимых нарушений, наиболее влияющих на возникновение сбойных ситуаций по вине служб аэропорта, авиаперевозчиков и других факторов

Код	Служба	Нарушения
И	ИАС	И05. Ошибки в планировании ТО, приведшие к необеспечению СПП. И13. Авиационное происшествие или инциденты по вине службы.
П	СОП	П13. Отказ пассажиров от полета после окончания посадки. П22. Несвоевременное внесение изменений в расписание.
Б	Служба бортпроводников	Б01. Опоздание на вылет в базовом, промежуточном и конечном аэропортах, в том числе из-за отсутствия резерва бригад бортпроводников.
Ш	Служба главного механика	Ш03. Отказы и неисправности стационарных и подвижных внутриаэропортовых средств механизации, спецоборудования.
А	Аэродромная служба	А03. Внеплановый ремонт ВПП, РД, МС и перронов. А04. Повреждение ВС и наземных светотехнических средств по вине служб. А05. Невыдерживание установленных плановых сроков ремонта элементов летного поля по вине аэродромной службы.
Г.	Служба ГСМ	Г01. Отказы и неисправности в работе стационарных средств заправки и перекачки топлива. Г04. Несвоевременное обеспечение поставок ГСМ. Г05. Несвоевременная доставка (перекачка) ГСМ от прирельсового или берегового склада ГСМ аэропорта до емкостей расходного склада или системы централизованной заправки ВС топливом. Г06. Подача на заправку некондиционных ГСМ и спецжидкостей.
Л	Летная служба	Л13. Эвакуация ВС с летного поля, если его занятость произошла по вине летного экипажа.
Д	Служба движения	Д04. Несогласованное с ПДС принятие решения на прием ВС или планирование ВС на вылет без учета пропускной способности аэропорта (кроме ситуаций, связанных с безопасностью полетов). Д07. Эвакуация ВС с летного поля, если его занятость произошла по вине службы движения. Д11. Временные режимы (включая время официальных церемоний встречи и проводов).
Я	Служба ЭРТОС	Я01. Отказы и неисправности средств радиотехнического обеспечения полетов.
Э	Служба ЭСТОП	Э01. Отказы и неисправности электросветотехнических средств обеспечения полетов. Э02. Отказы и неисправности резервных источников электропитания службы. Э03. Отказы и неисправности внутриаэропортового

		электроснабжения. Э04. Отказы и неисправности светосигнального обеспечения полетов.
У	ПДСП	У07. Несвоевременное внесение изменений в расписание, если функции работы с расписанием выполняются ПДСП.
Р	Служба режима	Р03. Ограничение приема и выпуска ВС по сигналу "Набат" и др.
Ж	Метеослужба	Ж03. Отказы метеорологического оборудования, установленного на аэродроме для обеспечения посадок ВС по метеоминимумам I, II и III категорий.
М	Метеоусловия	М01. На аэродроме вылета фактическая погода ниже минимума, установленного для взлета. М02. Прогноз и фактическая погода в пункте посадки, на запасных аэродромах и по маршруту не позволяет принять решение на вылет в соответствии с требованиями НПП. М06. Сбойная ситуация из-за скоплений ВС в аэропорту по метеоусловиям или занятости воздушного пространства зоны УВД аэродрома по метеоусловиям. М07. Задержки от начала опасного для авиации метеорологического явления до устранения его последствий (уборка снега, гололеда) в сроки, установленные НАС ГА. М10. Запреты полетов, связанные с проведением противорадовых стрельб.
Х	Задержки по вине ведомственной авиации и при конфликтных ситуациях	Х01. Занятость летного поля по вине ведомственной авиации в связи со стихийными бедствиями и авариями. Х02. Временное закрытие аэропорта из-за конфликтных ситуаций.

Нарушения регулярности полетов ВС и сбойные ситуации в аэропорту оказывают существенное влияние на следующие аспекты:

- дефицит времени при принятии решений в процессе оперативного управления аэропортом;
- показатели эффективности АП – KPI (Key Performance Indicator);
- ущерб для авиапассажиров, которые в соответствии с международными правовыми нормами и национальными законодательствами, в частности имеют право на соответствующую компенсацию;
- безопасность полетов.

Решение проблем *оперативного управления (ОУ) аэропортом* связано с процессами принятия решений по достижению основной цели – повышению эффективности его производственно-технологической деятельности [18, 61-63, 91]. Одним из основных инструментариев для достижения этой цели являются

автоматизированные системы (АС). Совершенствование методов принятия решений при ОУ деятельностью аэропорта на базе имитационных моделей представлено в работах [45, 51-55, 78, 86, 87]. Под руководством и при непосредственном участии диссертанта разработана АС «КОБРА», в том числе ее типовые подсистемы оперативного контура с модулями «СПП-ССЭ», «СПП-ССО», «УР-ССО», реализующие эвристический и оптимизационные алгоритмы выхода из ССА [28, 29, 32]. Результаты внедрения подсистем АС «КОБРА» с модулем «СПП-ССЭ» в 20 аэропортах нашей страны и за рубежом отражены в Акте внедрения РИВЦ-Пулково. Типовые подсистемы ОУ АС «КОБРА» дополненные модулем «СПП-ССО», внедрены в аэропортах Абакан и Сургут, что отражено в Актах.

Показатели КРІ аэропортов введены Руководством по экономике аэропортов [3]. Показатели КРІ являются средством количественного измерения фактической, прежней и ожидаемой в будущем эффективности.

Виды показателей КРІ АП составляют:

- безопасность полетов;
- качество обслуживания;
- производительность;
- рентабельность;
- регулярность выполнения полетов.

Детализация этих видов показателей для АП в соответствии с Руководством по экономике аэропортов приведена в работе [37]. Приведем детализацию только по КРІ АП, связанным с качеством обслуживания и регулярностью рейсов, как в наибольшей степени характеризующие сбойные ситуации и последствия их разрешения.

КРІ «Качество обслуживания» измеряется с учетом интересов как эксплуатантов ВС, так и конечных пользователей.

К показателям КРІ по качеству обслуживания ВС в аэропорту относятся:

- средняя ежедневная пропускная способность аэропорта (количество ежедневных взлетно-посадочных операций);

- количество обоснованных задержек рейсов;
- средняя продолжительность задержек на один рейс.

Пассажиры оценивают качество аэропортового обслуживания по следующим показателям:

- время нахождения в очереди при досмотрах службами безопасности;
- процент времени, затрачиваемого на оформление и получение багажа;
- точность экранной информации;
- общая удовлетворенность со стороны пассажиров и др.

Проблемы, связанные с качеством обслуживания ВС в аэропорту исследовались в работе [26] и др. авторов.

KPI «Регулярность выполнения полетов» оценивается по следующим параметрам:

- посадка рейсов;
- прибытие рейсов;
- отправление рейсов;
- вылет рейсов.

Проблемы регулярности полетов, методы анализа задержек отправления ВС и их распределения в предприятиях по временам суток и др. исследовались в работах [59-61] и др. авторов.

В комплексе все указанные выше KPI АП взаимосвязаны. На этапе текущего планирования они определяются РДС, а на этапе оперативного управления СПП и ТГНО ВС. ТГНО ВС регламентируют временные интервалы выполнения операций в зоне обслуживания ВС в аэропорту, которые обязательны к исполнению при выполнении СПП [11, 14]. Отметим при этом, что в ТГНО ВС, как правило, не учитываются: время, необходимое для передвижения персонала, а также время подачи автомобильного транспорта и средств механизации на перроны; время на удаление обледенения; время буксировки ВС; время на обогрев салона ВС; время подогрева санузлов; запуск двигателей; время регистрации пассажиров и багажа, время предполётного досмотра, количество работников в сменах и др. Таким образом, даже в

штатных ситуациях ТГНО конкретных ВС подлежат оперативной корректировке, а в условиях ССА такие корректировки приобретают массовый характер. Коррективы в порядок ТГНО ВС вносит сменный руководитель производственно-диспетчерской службы (ПДС) или службы с иным названием, но с аналогичными функциями, например, – контрольно-диспетчерской службы и др. Он же определяет очередность обслуживания ВС в сбойных ситуациях или при одновременном обслуживании нескольких рейсов. С целью анализа ССА и принятия дальнейших решений, сменный начальник ПДС имеет право организовывать оперативные совещания из числа руководителей смен, участвующих в технологическом процессе обслуживания ВС.

Ущерб для авиапассажиров и грузоотправителей, вызываемый ССА, носит моральный и материальный характер [1, 4]. За несвоевременное выполнение технологических операций, предусмотренных ТГНО ВС, недостаток ресурсов, необходимых для обслуживания ВС, несвоевременное предоставление информации о движении ВС, точность идентификации причин нарушений регулярности при устранении последствий ССА и обеспечении регулярности полетов аэропорты несут ответственность соответствующие службы аэропорта.

В зарубежных аэропортах в настоящее время внедрены различные ИТ на базе систем планирования ресурсов предприятий EPR (Enterprise Resource Planning) [92], обеспечивающие:

- интеграцию производственных баз данных аэропортов, авиакомпаний и других субъектов;
- реализующие соответствующие алгоритмы оперативного принятия решений при ССА.

Широко известна ИТ совместного принятия решений Collaborative Decision Making (CDM) [120]. В частности, CDM внедрена в аэропорту Шереметьево и применяется для повышения согласованности действий партнеров аэропорта Шереметьево – авиакомпаний, УВД и хендлинговых компаний. Применение CDM позволяет партнерам улучшить взаимодействие и

повысить пропускную способность в пиковый период. Однако алгоритмы работы этой и других подобных зарубежных ИТ являются коммерческой тайной и практически не публикуются в открытой печати. Поэтому актуальной проблемой импортозамещения является разработка соответствующих отечественных ИТ.

*Резюмируя вышеизложенное отметим, что проблеме устранения предпосылок возникновения и устранения последствий ССА уделяется важное внимание на этапах составления и оперативной корректировки СПП, порядка наземного обслуживания ВС, работы со скоплениями пассажиров в аэропорту, но **проблемы оптимизации процессов проблемы оптимизации процессов оперативного управления выходом из ССА**, также как и **проблемы импортозамещения зарубежных ИТ, целенаправленно не исследовались**, что подтверждает актуальность настоящих диссертационных исследований.*

1.2. Динамика и тренд статистических показателей регулярности отправления воздушных судов

Несмотря на многообразие значимых нарушений (таблица 1.1), наиболее влияющих на возникновение ССА, в форме 30-ГА федерального статистического наблюдения за деятельностью ВТ «Сведения о выполнении расписания (плана) отправлений самолетов, вертолетов (далее – воздушных судов (ВС)) из начального и промежуточных пунктов рейса (независимо от принадлежности ВС)» фиксируются только нарушения, связанные с метеоусловиями и из-за отсутствия ГСМ [7]. Проведем анализ динамики и тренда этих сводных статистических показателей регулярности отправлений ВС и ее нарушений, приняв за основу фактические данные за 2006-2015 годы из формы 30-ГА [30, 73]. Состав показателей формы по указанным годам представлен в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Сводные показатели формы 30-ГА за 2006-2015 годы

Год	Количество отправок ВС выполненных - всего, тыс.	В т. ч. выполненных с опозданием - всего, тыс.	Из них				Общее время опозданий отправок ВС – всего, тыс. самолето-часов (Т)		в том числе			
			по метеоусловиям		из-за отсутствия ГСМ		первоначальное опоздание	ЗПС	по метеоусловиям (Т _м)		из-за отсутствия ГСМ	
			первоначальное опоздание	задержка прибытия ВС (ЗПС)	первоначальное опоздание	ЗПС			первоначальное опоздание	ЗПС	первоначальное опоздание	ЗПС
	<i>S</i>	<i>D</i>	<i>D_{мп}</i>	<i>D_{мз}</i>	<i>D_{fp}</i>	<i>D_{fz}</i>	<i>T_p</i>	<i>T_z</i>	<i>T_{мп}</i>	<i>T_{мз}</i>	<i>T_{fp}</i>	<i>T_{fz}</i>
2006	340.2	69.2	14.1	10.6	0.1	0.1	123.0	76.6	77.3	48.5	0.4	0.2
2007	524.6	111.9	18.8	13.2	0.1	0.1	145.9	96.9	80.4	59.4	0.2	0.1
2008	572.2	112.0	17.2	14.3	0.3	0.1	165.0	113.6	86.7	67.2	2.4	0.3
2009	542.5	94.3	15.2	11.6	0.1	0.1	119.4	93.1	68.2	57.7	0.1	0.1
2010	570.3	117.9	16.3	12.4	0.1	0.1	166.9	102.1	79.1	54.0	0.1	0
2011	652.7	123.9	17.1	11.0	0.1	0.1	166.9	102.1	79.1	54.0	0.1	0
2012	690.5	137.9	21.3	11.0	0.1	0	173.2	93.5	90.2	44.6	0.1	0
2013	744.5	158.9	24.8	11.5	0.2	0	180.8	101.1	106.3	45.7	0.3	0.1
2014	848.8	149.6	22.9	9	0.1	0	180.0	98.2	103.1	44.3	0.1	0
2015	782.4	123.5	18.2	6.9	0.1	0	152.1	75.1	97.0	34.7	0.1	0

Сведения по этой форме представляют ПДС аэропортов. Регулярность отправок ВС (независимо от их принадлежности) учитывается по всем транспортным полетам, предусмотренным расписанием, а также по рейсам вне расписания с пассажирами, согласно плану полетов (всего рейсов – *S*, выполненных с опозданием – *D*).

Из числа рейсов *D*, выделены рейсы, причинами задержки которых были: метеоусловия; отсутствие горюче-смазочных материалов (ГСМ). По каждой из причин задержки в форме выделено отдельно количество первоначально задержанных отправок (*D_{мп}* и *D_{fp}*) и количество отправок, выполненных с опозданием вследствие задержки прибытия самолета (ЗПС) (*D_{мз}* и *D_{fz}*), как по метеоусловиям, так и из-за отсутствия ГСМ соответственно. Затем показано общее время опоздания отправок ВС – также первоначально задержанных и вследствие ЗПС (*T_p* и *T_z*), как по метеоусловиям (*T_{мп}* и *T_{мз}*), так и из-за отсутствия топлива (*T_{fp}* и *T_{fz}*).

К сожалению, форма 30-ГА не детализирует других причин нарушений регулярности выполнения рейсов, помимо метеоусловий и отсутствия ГСМ, таких как факторы технического (неисправности самолета, аэродромного оборудования, помехи на ВПП и т.д.) и организационного характера (неготовность документации, опоздание доставки питания на борт, опоздание экипажа и т.д.). В то же время, фактор отсутствия ГСМ, очень важный в 90-е

годы, практически перестал влиять в настоящее время на опоздания, как первоначально отправленных, так и прибывающих ВС. Показатели D_{fp} , D_{fz} , T_{fp} , T_{fz} более чем на два порядка меньше аналогичных показателей, связанных с задержками по метеоусловиям. Поэтому эти показатели, также, как и показатели T_{fp} и T_{fz} , анализировать не будем.

Динамика изменения и тренд доли рейсов, выполненных с опозданием в целом по ГА (D/S) (коэффициент не регулярности полетов) в процентах за 2006-2015 годы, рассчитаны и представлены на рисунке 1.1.

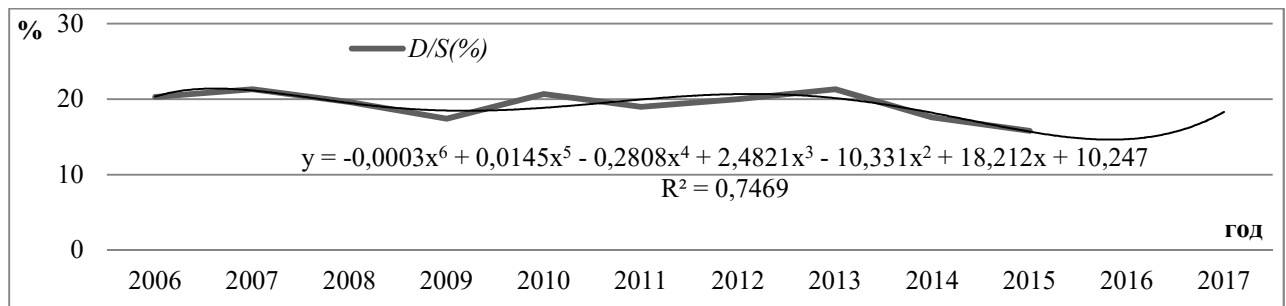


Рисунок 1.1 – Динамика и тренд доли D/S в % в целом по ГА

Для выявления трендов на этом рисунке и далее используется инструментарий Trend Excel. Вид уравнения регрессии выбирается из всех возможных вариантов, дающих наибольшее и существенное значение коэффициента детерминации R^2 .

Приведенное на рисунке 1.1 уравнение полиномиальной регрессии с высоким значением $R^2 = 0.7469$ показывает волнообразный тренд коэффициента не регулярности полетов без перспективы его уменьшения. Качественно этот вывод на перспективу также подкрепляется существенным ухудшением климатических условий на планете.

На рисунке 1.2 представлена динамика и тренд среднего времени опоздания отправления ВС (T/D), которое в среднем за рассматриваемый период составляет 1.96 час. Уравнение логарифмической регрессии, представленное на этом рисунке, со значимым коэффициентом детерминации ($R^2 = 0.6051$) показывает тенденцию сокращения рассматриваемого показателя на ближайшую перспективу.

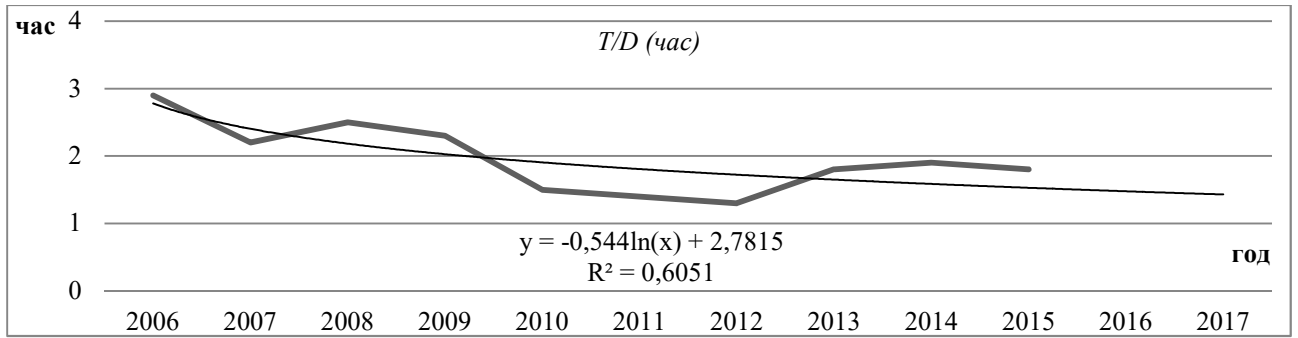


Рисунок 1.2 – Динамика и тренд среднего времени опоздания отправления ВС (T/D)

На рисунке 1.3 представлены динамика и тренд относительного показателя опоздания отправления по условиям метео T_m/T (в процентах) ВС, полученный также с использованием данных таблицы 1.2.

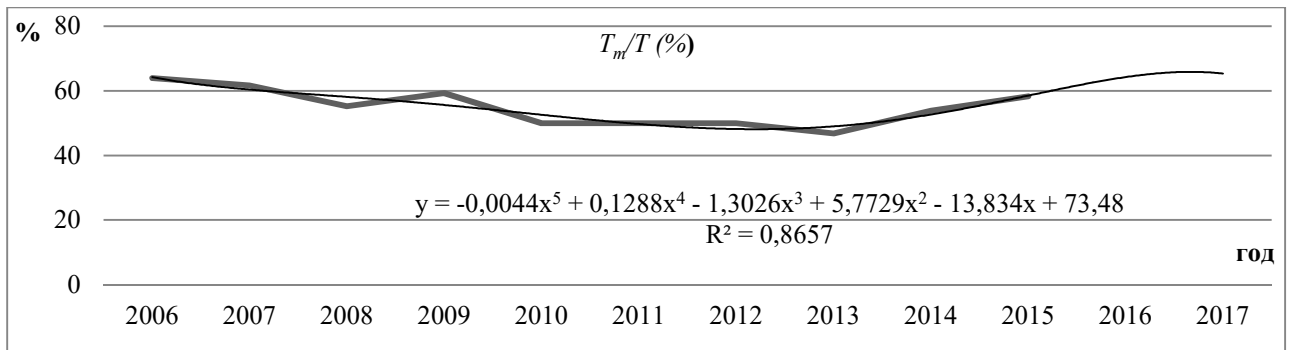


Рисунок 1.3 – Динамика и тренд доли времени опоздания отправления по условиям метео T_m/T (%)

График показывает непрерывное снижение влияния метеоусловий на время опоздания отправления ВС вплоть до 2013 года и рост в последние годы. В среднем за наблюдаемый период этот показатель составил около 55%, т.е. метео в наибольшей мере влияют на регулярность полетов среди других причин нарушения регулярности полетов. Уравнение полиномиальной регрессии с высоким коэффициентом детерминации ($R^2 = 0.8657$) показывает, что в ближайшей перспективе снижение этого показателя не предвидится и его значение будет существенно превышать 50%.

Проанализируем далее влияние метеоусловий на задержку отправления ВС для аэропортов различных классов: Домодедово (класс А); Внуково (класс Б); Томск (класс В); Нальчик (класс Г). В таблице 1.3 представлены выборочные данные из формы 30-ГА по времени опоздания отправления ВС в целом и по метео по аэропортам отдельных классов, а на рисунках 1.4-1.7

отражена динамика и тренды относительного показателя T_m/T (%) по указанным аэропортам.

Таблица 1.3 – Выборочные показатели времени опоздания отправления ВС в целом и по метео по типичным аэропортам различных классов (Домодедово, Внуково, Томск, Нальчик) за 2006-2015 годы (%)

Год	Домодедово		Внуково		Томск		Нальчик	
	T	T_m	T	T_m	T	T_m	T	T_m
2006	40 519	15 776	4 053	1 030	2 363	489	999	231
2007	75 990	27 945	39 301	10 662	2 836	408	1 053	282
2008	91 803	19 622	46 870	14 794	2 881	453	860	160
2009	87 152	15 559	45 409	13 036	2 531	284	659	222
2010	100 378	20 955	52 084	21 219	3 110	290	898	288
2011	115 416	25 583	49 811	14 037	3 430	439	1 663	418
2012	121 074	27 014	68 630	21 654	3 405	572	1 297	226
2013	126 142	28 783	71 689	20 152	3 675	658	1 396	315
2014	134 383	29 835	124 356	21 125	3 878	507	1 079	177
2015	123 420	23 011	64 623	11 969	3 475	442	1 228	174

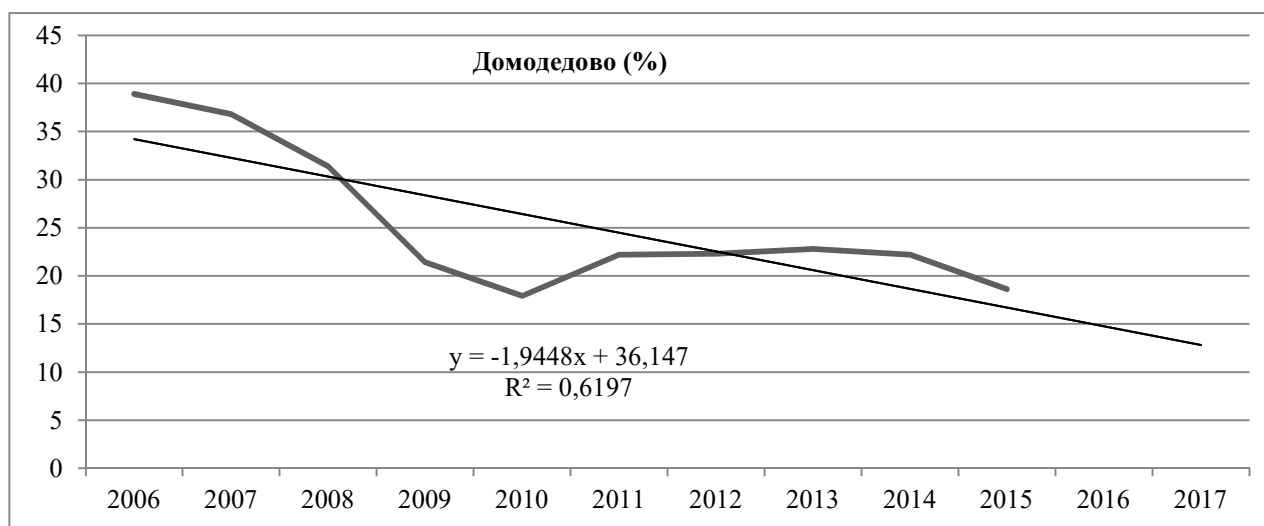


Рисунок 1.4 – Динамика и тренд относительного показателя T_m/T (%) для аэропорта «Домодедово»

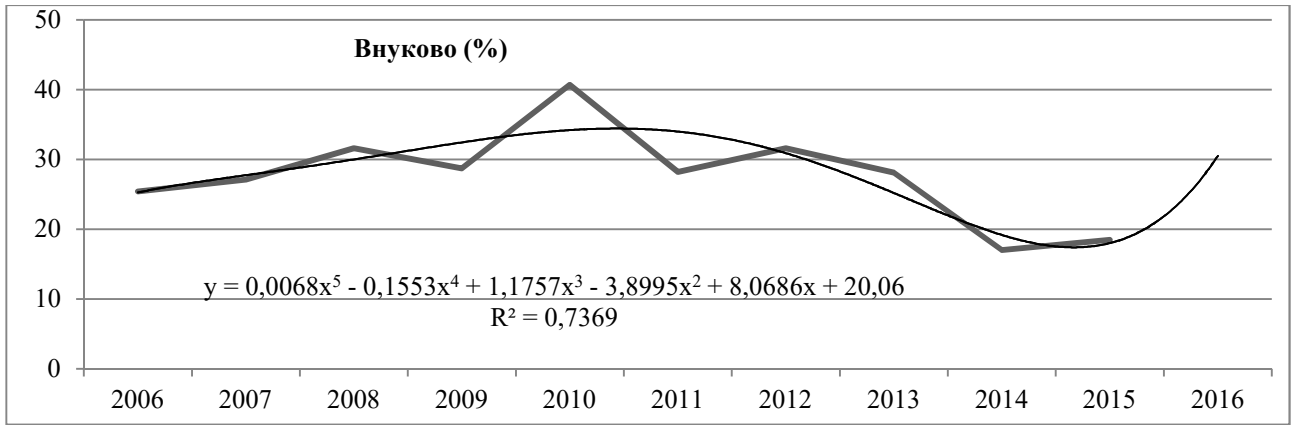


Рисунок 1.5 – Динамика и тренд относительного показателя T_m/T (%) для аэропорта «Внуково».

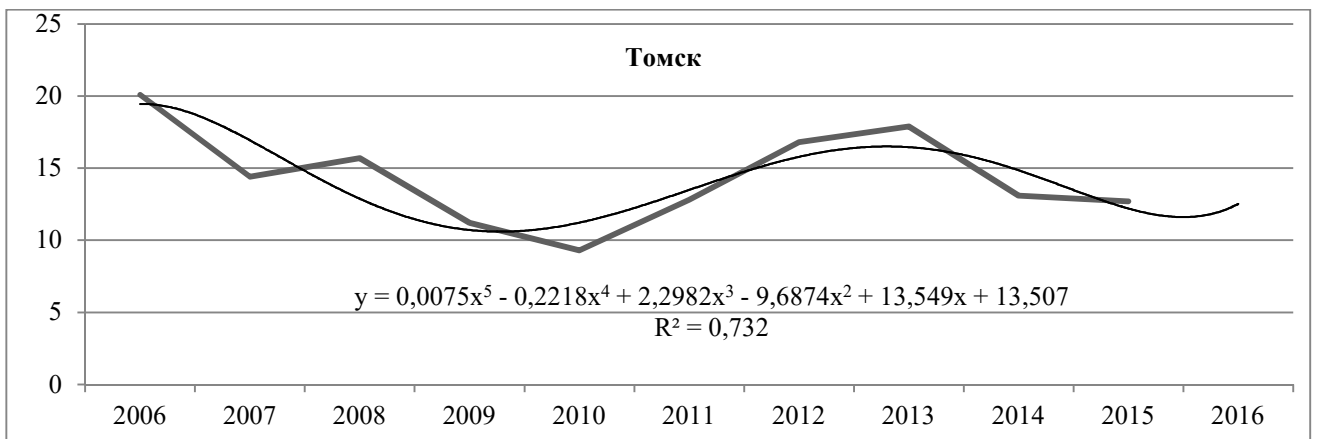


Рисунок 1.6 – Динамика и тренд относительного показателя T_m/T (%) для аэропорта «Томск».

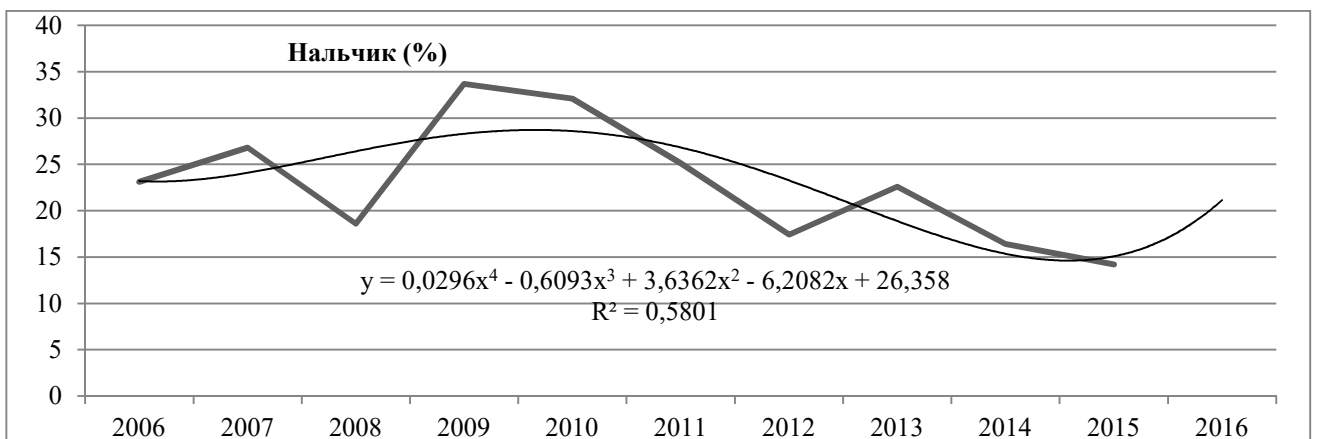


Рисунок 1.7 – Динамика и тренд относительного показателя T_m/T (%) для аэропорта «Нальчик».

Отметим, что только в аэропорту «Домодедово» наблюдается тенденция по снижению относительной доли времени отправления ВС по метеоусловиям. Возможно такой тренд высокой степенью автоматизации процессов ОУ в этом

аэропорту. Вместе с тем, по другим выбранным аэропортам тренд на ближайшую перспективу является растущим. Таким образом, на основе выбранных примеров по другим аэропортам нельзя сделать однозначных выводов о тенденции изменения этого показателя на краткосрочную перспективу. Для этой цели требуется обобщение всех статистических данных по каждому классу аэропортов, учитывать особенности их синоптического месторасположения, а также степень автоматизации процесса по корректировке суточного плана полетов и принятия решений по отправке ВС. Однако, решение такой задачи не входило в диссертационные исследования.

1.3. Концептуальный анализ процессов координации и взаимодействия служб аэропорта и других субъектов при нарушении регулярности полетов и в сбойных ситуациях

Координация действий всех служб и подразделений аэропорта возлагается на *производственно-диспетчерскую службу предприятия (ПДСП)*, которая в общем случае [10, 15, 26]:

- составляет СПП и передает их во все службы аэропорта;
- контролирует работу всех служб по технологическому графику, который включает техническое и коммерческое обслуживание ВС;
- *при задержках рейсов и в сбойных ситуациях* согласовывает вылет ВС с промежуточными аэропортами посадки;
- осуществляет контроль движения ВС на всю глубину полета, обеспечивает этой информацией пассажиров и персонал;
- контролирует расстановку ВС на перроне и местах стоянки;
- принимает меры по выполнению СПП и др.

Важным компонентом предупреждения ССА является использование активной *информационно-управляющей системы (ИУС)*. Перечень возможных средств предупреждения сбойных ситуаций (СС) при эксплуатации активной ИУС представлен на рисунке 1.8 [27]. Средства непосредственного

предупреждения пользователя включают в себя различные средства наземных служб, АТБ и т.п. В ИУС могут быть реализованы как формализованные процедуры, так и применяться экспертные системы (ЭС), необходимые для реализации логико-лингвистических моделей. Возможна комбинация указанных способов в рамках гибридных экспертных системах.

Подобные ИУС используются и как средства косвенного предупреждения ССА путем накопления данных (включая различные КРІ), отражающих деятельность авиапредприятия. Эти данные могут с определенной периодичностью анализироваться различными специалистами для подготовки соответствующих профилактических решений по совершенствованию работы АП. Иногда данные могут непосредственно использоваться пользователем для принятия им решения с целью предупреждения СС или выхода из нее, что показано пунктирными связями на рисунке 1.8 между системами накопления и средствами непосредственного предупреждения.

Эффективность предупреждения и устранения последствий,—ССА, является чрезвычайно важным фактором для аэропортов, авиакомпаний и обслуживаемых ими пассажиров. Мероприятия по разрешению сбойных ситуаций подразделяются на текущие и оперативные.

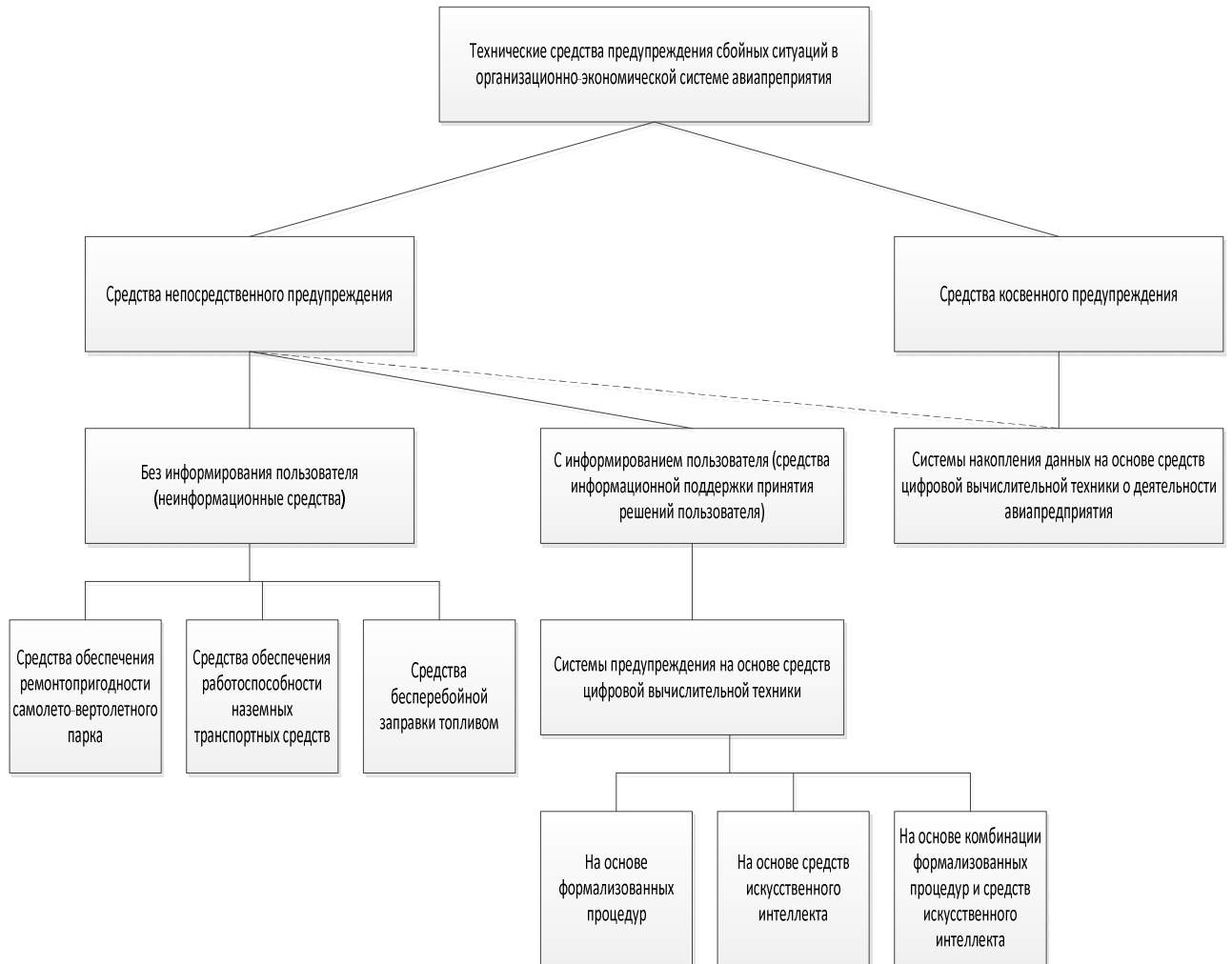


Рисунок. 1.8 – Классификация технических средств предупреждения ССА

Текущие мероприятия связаны с изучением и разработкой плановых мер по устранению причин возникновения ССА, разработкой соответствующих профилактических мер и совершенствованием технологий взаимодействия служб по выходу из ССА.

Оперативные мероприятия направлены на скорейший выход из конкретных ССА с минимально возможными дополнительными затратами.

Функции выхода из ССА являются одними из важнейших функций *оперативного управления производственной деятельностью (ОУПД)* аэропорта. ОУПД АП связано главным образом с оперативным управлением ресурсами АП и направлено на повышение КРІ аэропорта – безопасности полетов, качества обслуживания клиентов, производительности и

рентабельности. Анализ функций и процессов ОУ АП на базе АС «КОБРА-2» проведен диссертантом в работах [28,37].

Управляемыми ресурсами являются сотрудники на определенных должностях и с определенными навыками, объединенные в подразделения организационной структуры аэропорта, и технические средства определенных типов, которыми оснащены подразделения (рис 1.9).

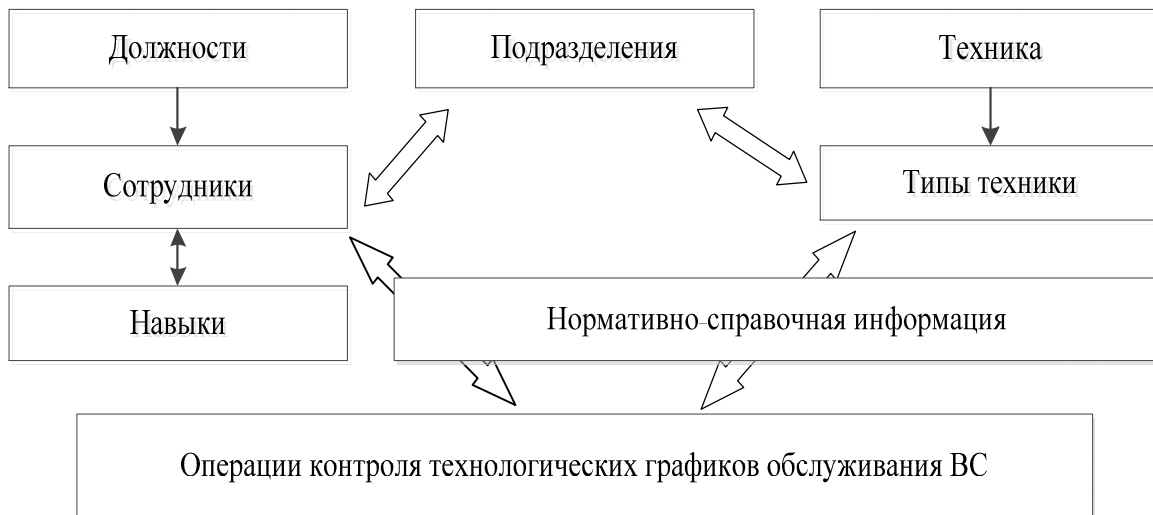


Рисунок 1.9 – Управляемые ресурсы аэропорта

Детализация управляемых ресурсов аэропорта представлена на рисунке 1.10.

Основные действия при ОУПД аэропорта в сбойных ситуациях (на примере АП «Пулково» и др. АП):

- создание оперативного штаба под руководством генерального директора (заместителя) аэропорта;
- анализ сложившейся ситуации оперативным штабом;
- принятие оперативным штабом решений, направленных на обеспечение работы в ССА.

Состав оперативного штаба представлен на рисунке 1.11.

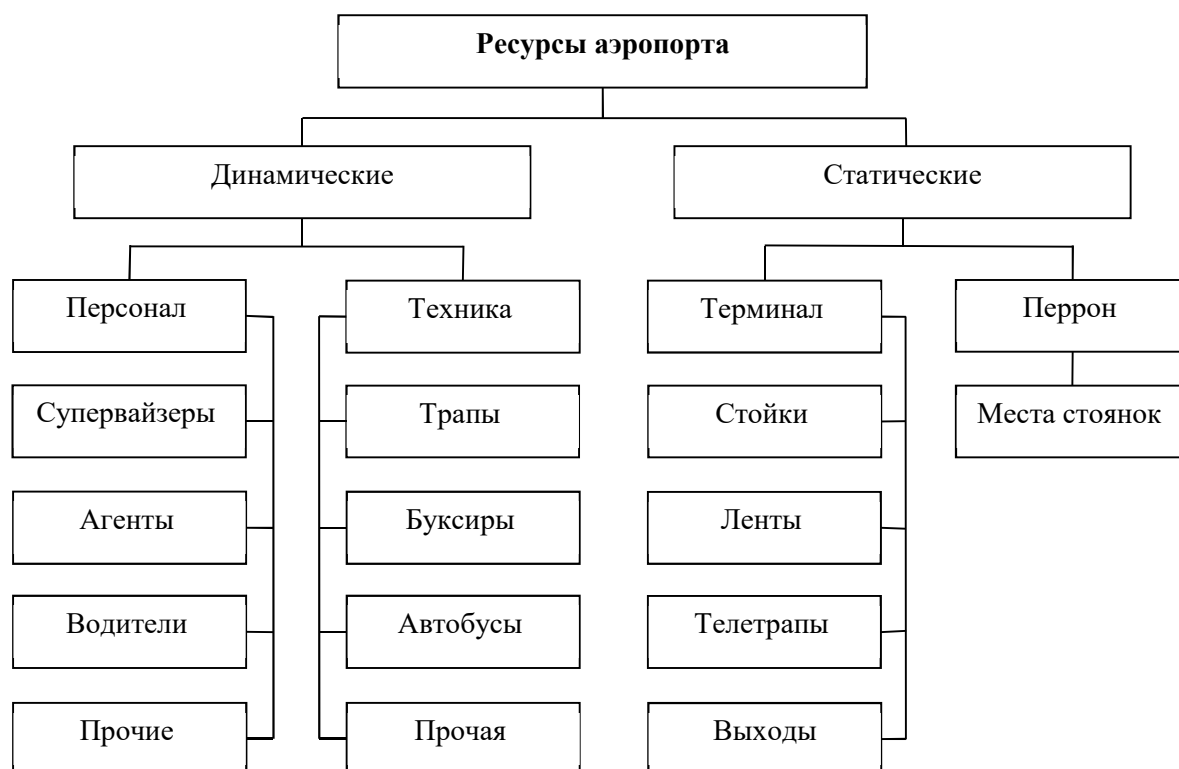


Рисунок 1.10 – Структура ресурсов аэропорта

Оперативный штаб принимает решения по следующим проблемам:

- усиление служб АП динамическими ресурсами и рационализация использования статических ресурсов;
- обеспечение необходимого вывода АП из сбойной ситуации за минимальное время;
- обеспечение контроля своевременного выполнения принятых мер.

В обязанности оперативного штаба входят:

- оперативная корректировка СПП и ТГНО ВС в соответствии с принятыми критериями устранения ССА;
- выделение при необходимости дополнительных ресурсов и обеспечение оперативной координации всех служб аэропорта;
- совмещение рейсов и распределение пассажиров по рейсам авиакомпаний-партнеров по согласованию с ними;
- оперативное информирование авиапассажиров и представителей АК средствами аудио, видео и телеграфной и другой связи о принимаемых решениях по выводу из ССА;

- обеспечение дополнительных мер авиационной безопасности.



Рисунок 1.11 – Состав оперативного штаба АП

На основе информации оперативного штаба о ССА перевозчики обязаны без взимания дополнительной платы организовать для пассажиров услуги, определенные Приказом №82 от 28 июня 2007 г. [4, 10], а также могут предоставлять пассажиру дополнительные услуги повышенной комфортности в полете и на земле.

Схема взаимодействия оперативного штаба с внешними организациями города по обслуживанию пассажиров при ССА представлена на рисунке 1.12.



Рисунок 1.12 – Схема взаимодействия оперативного штаба с внешними организациями города при ССА

1.4. Анализ состояния автоматизации процессов оперативного управления аэропортом

Оперативное управление аэропортовой деятельностью осуществляется путем регулирования и контроля выполнения операций всех служб (операторов), задействованных в обеспечении СПП.

Для повышения эффективности обслуживания ВС, кроме оптимизации внутренних производственных процессов аэропорта, необходимо добиться работы всех субъектов процессов обслуживания в едином информационном пространстве [38]. К таким субъектам относятся подразделения аэропорта, представители авиакомпаний, наземные подразделения авиакомпаний в аэропортах базирования, обслуживающие компании, службы организации воздушного движения и другие. Для достижения положительного результата было необходимо провести анализ текущего уровня автоматизации аэропортов и выявить их актуальные потребности для проектирования новых ИТ-решений. Для решения этой задачи в 2015 – 2017 гг были проведены анкетные опросы ИТ-

руководителей нескольких десятков аэропортов (в 2017 г – 37 аэропортов), среди которых ключевые предприятия отрасли – Домодедово, Внуково, Пулково, Сочи, Екатеринбург, Новосибирск и др. [39, 40-43].

Результаты опроса показывают наличие банальных проблем, обусловленных все еще в достаточно большой степени:

- хранением и обработкой данных на бумажных носителях;
- разрозненным хранением информации в различных файлах и базах данных;
- затрудненным контролем процессов оперативного управления аэропортом, особенно в нештатных и сбойных ситуациях;
- излишеством передаточных звеньев;
- неоднократным вводом одинаковой информации;
- локальностью внедренных АС;
- отсутствием интеграции между АС аэропорта и АС других партнеров воздушного транспорта.

Основными ошибками при внедрении ИТ-систем по результатам опроса признаны:

- отсутствие точной и комплексной постановки задачи по автоматизации процессов;
- нацеленность преимущественно на решение локальных проблем;
- выбор «коробочных» решений;
- недостаточный уровень управления и контроль ходом реализации проектов;
- верой в бренды;
- «долгострой».

По результатам анализа определены:

- приоритеты автоматизации процессов обслуживания в аэропортах;
- степень автоматизации оперативного управления производственно-технологическими процессами работы аэропортов;

- приоритеты востребованности новых IT-приложений;
- способы осуществления информационно-справочных услуг;
- наличие импортозамещающего отечественных IT-приложений;
- состояние инфокоммуникационной архитектуры.

Выявленные приоритеты автоматизации процессов обслуживания в аэропортах по десяти бальной шкале мало изменяются за период 2015-2017 гг. Оценки за 2017 г. представлены в виде диаграммы (рисунок 1.13).

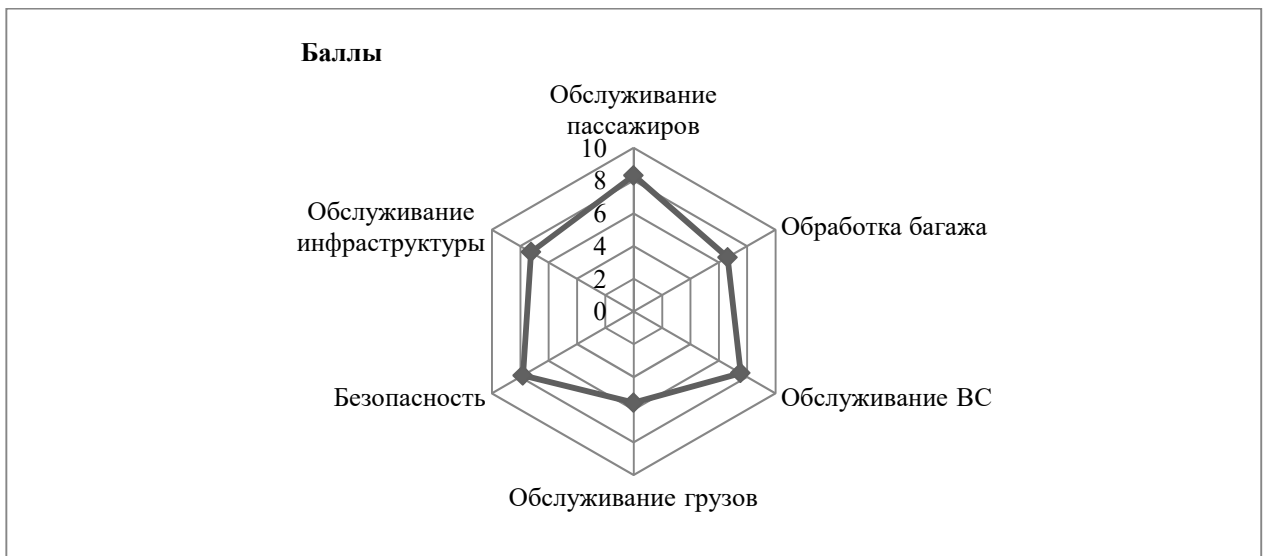


Рисунок 1.13 – Приоритеты основных направлений автоматизации процессов в аэропортах

Наиболее востребованными направлениями автоматизации IT-руководителями аэропортов признаны процессы обслуживания пассажиров (средний бал 7,64) и ВС (7,24).

Степень автоматизации оперативного управления производственно-технологическими процессами работы российских аэропортов пока еще явно не достаточна. Так, 57% из них вообще не имеют такого инструментария. Доля IT-систем среди эксплуатирующих их аэропортов по основным направлениям автоматизации представлена на диаграмме (рисунок 1.14).

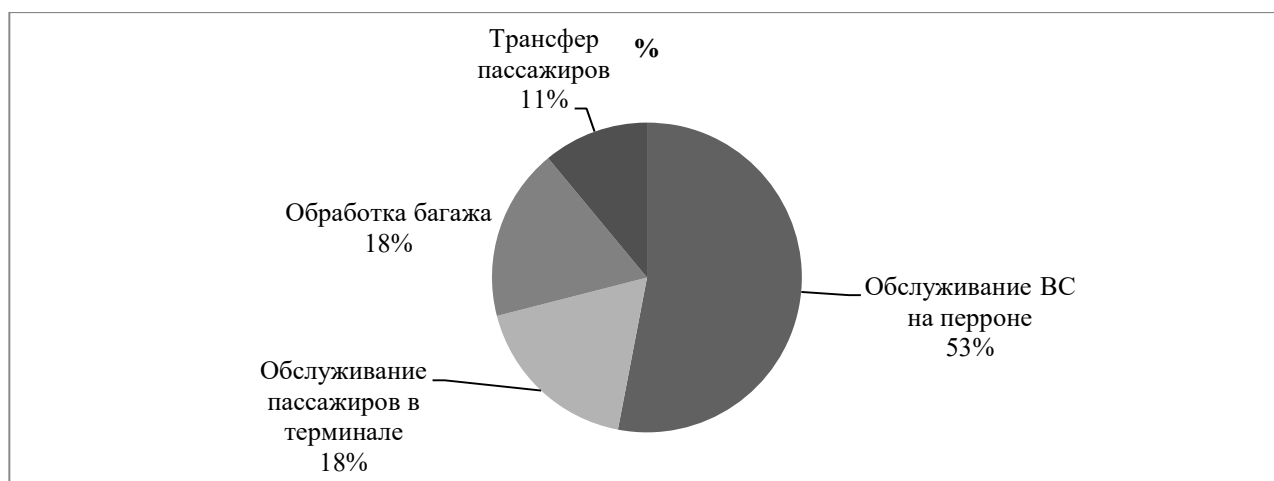


Рисунок 1.14 – Доля ИТ-систем по основным направлениям автоматизации аэропортов

Диаграмма приоритетов востребованности новых ИТ-приложений представлена на рисунке 1.15. Наибольшая востребованность выявлена по новым ИТ-приложениям по направлениям, обеспечивающим повышение эффективности и качества оперативного управления и информирования, что важно в ССА:

- информирование пассажиров;
- мониторинг трансферных потоков;
- управление совместным принятием решений;
- контроль движения ВС и динамических ресурсов на перроне.

Данные на рисунке 1.15 отображают долю (в %) числа ИТ-руководителей аэропортов, считающих данное направление автоматизации наиболее важным. Одной из основных оценок качества работы аэропортов пассажирами является обеспечение бесперебойного и достоверного информирования пассажиров о состоянии рейсов (задержки прилетов/отправлений) и, особенно, – в сбойных ситуациях. Ранее такое обслуживание осуществлялось телефонной справкой, визуальным и звуковым информированием в аэропорту. Телефонная справка в настоящее время становится все менее актуальной, несмотря на то, что ее современный аналог (CALL-центр) предоставляет пассажирам значительно больший функционал.



Рисунок 1.15 – Приоритеты востребованности новых IT-приложений для аэропортов

Визуальное и звуковое информирование в аэропорту все также остается наиболее востребованным. Этому способствуют как все более совершенные технические средства, так и новые функциональные и программные возможности систем информирования (мультиязычность, компьютерная синтезация речи). В последние годы существенно вырос сервис оповещения пассажиров через веб-сайт аэропорта. Также началось развитие мобильных оповещений (мобильное приложение аэропорта, TelegramBot, WhatsAppBot). В ближайшие годы эти сервисы должны стать таким же общедоступными и востребованным, как мобильный банкинг и заказ такси. По результатам анализа доля средств информационно-справочного обслуживания о состоянии рейсов в отечественных аэропортов приведена в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Средства информационно-справочного обслуживания отечественных аэропортов

№	Наименование	Доля (%)
1	Визуальное информирование	95
2	Звуковое информирование	95
3	Call-центр	95
4	Оповещение на веб-сайте	82
5	Мобильное оповещение	83
6	TelegramBot	2
7	Email-уведомления	2
8	Социальные сети	2

На сегодняшний день практически в каждом международном аэропорту нашей страны присутствует доступ в интернет через беспроводные сети wi-fi в терминалах аэропортов (доля оснащённости wi-fi по 2017 г. составляет 57%). Сферы и доли применения этих средств отображены на диаграмме (рисунок 1.16).

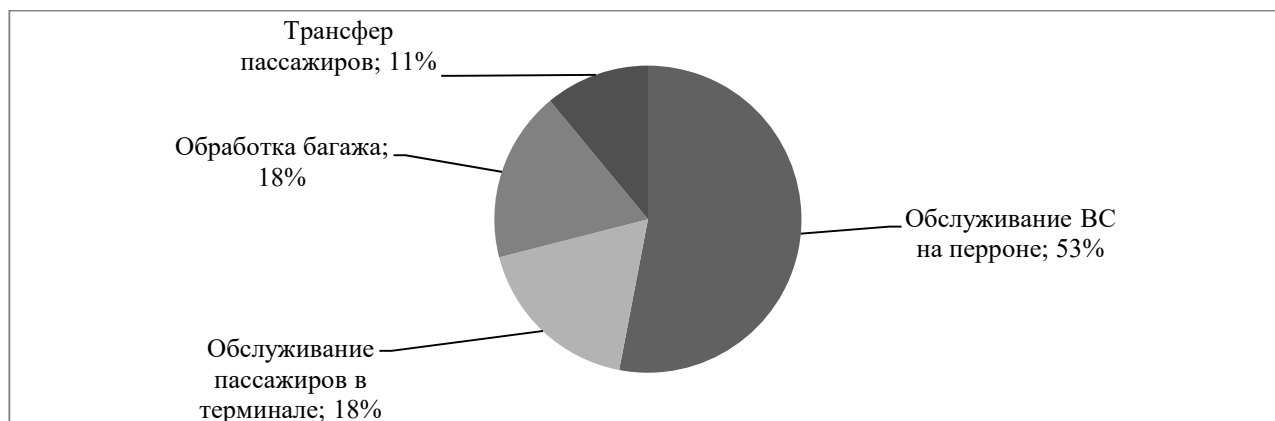


Рисунок 1.16 – Сферы и доли применения wi-fi в аэропортах

Большинство аэропортов в настоящее время в основном используют отечественные программные продукты (рисунок 1.17).

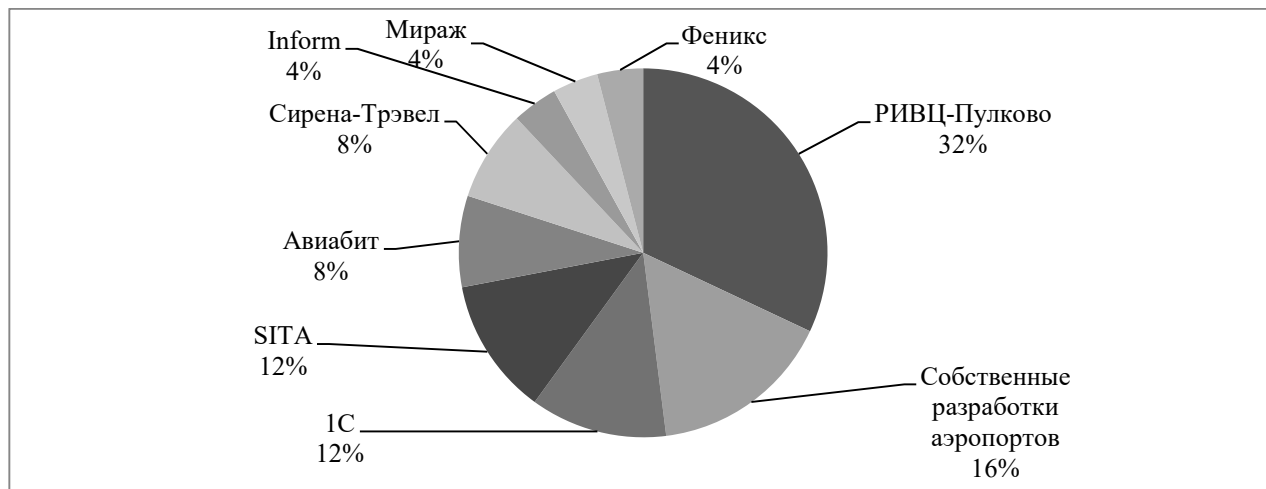


Рисунок 1.17 – Предприятия-разработчики и доля их ПО

Большинство из этих продуктов были разработаны в прошлом десятилетии. Такие программы удовлетворяли потребности аэропортов, но с бурным развитием IT-технологий стали устаревать. Необходимые доработки не проводились, поддержка программных продуктов не была организована должным образом. Вследствие этого оценка отечественных программных продуктов приобрела негативную окраску в авиационном сообществе. В 2016-

2017г IT-руководители аэропортов выделили ряд недостатка отечественных разработок, перечень и вес которых отображен на диаграмме (рисунок 1.18).

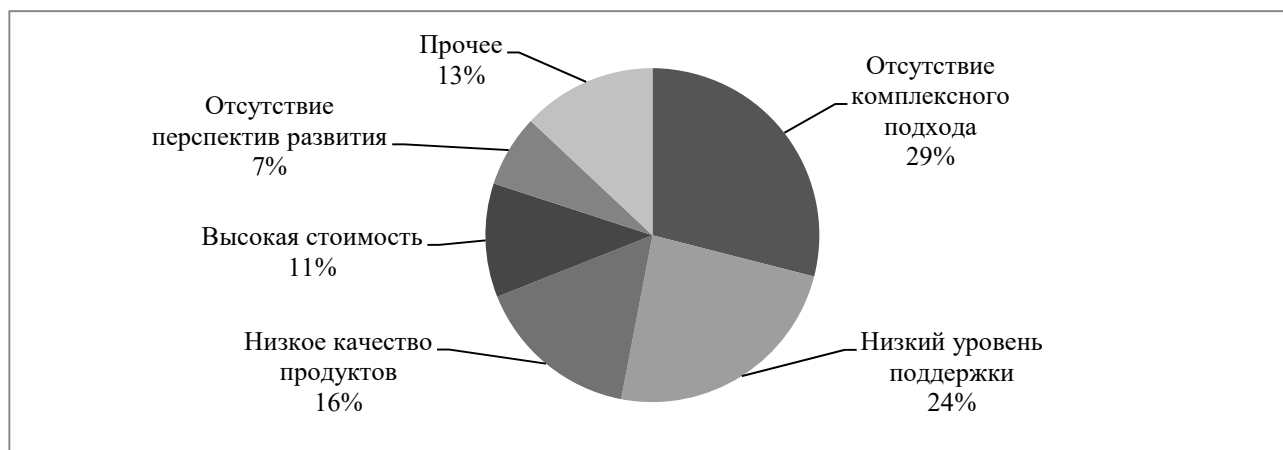


Рисунок 1.18 – Основные недостатки отечественного ПО и их вес

Результаты исследования только подтвердили необходимость развития информационных технологий на профессиональном уровне. Современные требования к качеству IT-продуктов и технологической поддержки выявили необходимости: постоянного совершенствования и гибкой конфигурации продуктов; ввода стандартов ПО предприятий-разработчиков. Состояние инфокоммуникационной архитектуры, включающей совокупность серверного и телекоммуникационного оборудования, каналов связи, общесистемных программных средств и нормативных документов, определяет фундамент для построения и последующего развития всех информационно-технологических сервисов аэропорта. Успех от реализации IT-проектов во многом зависит не только от наличия высокопроизводительных средств компьютерной и инфокоммуникационной техники, но и от того, насколько оптимально будут выстроены информационные потоки как между подразделениями аэропорта, так и с внешними поставщиками и потребителями. В связи с этим отметим важность облачных технологий (сервисов), которые в последнее десятилетие получили широкое распространение. Тем не менее в гражданской авиации ведущих мировых держав эта тенденция практически не просматривается. Не только крупные и средние, но зачастую и небольшие аэропорты предпочитают размещать свои ресурсы в собственных центрах обработки данных (ЦОД). Это

подтверждает и проведенный статистический анализ по результатам опроса ИТ-руководителей аэропортов (рисунок 1.19).

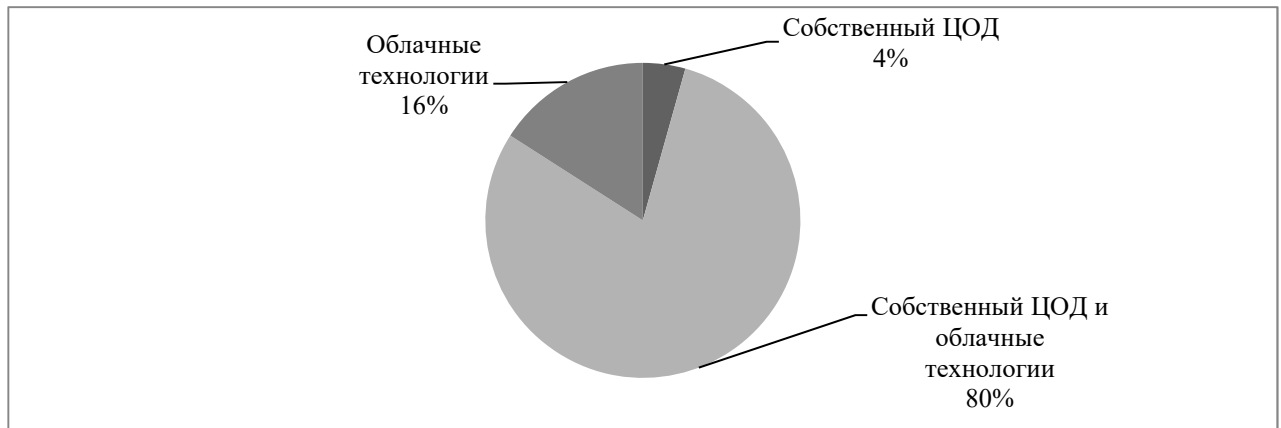


Рисунок 1.19 – Варианты размещения ИТ-продуктов

Средний возраст серверного оборудования аэропортов выглядит достаточно критичным (рисунок 1.20). Для большинства аэропортов уже в ближайшие годы может возникнуть потребность в модернизации собственных ЦОД, либо в переводе своих вычислительных мощностей в «облака». Состояние этой проблемы иллюстрирует диаграмма доли количества серверов в аэропортах (рисунок 1.21).

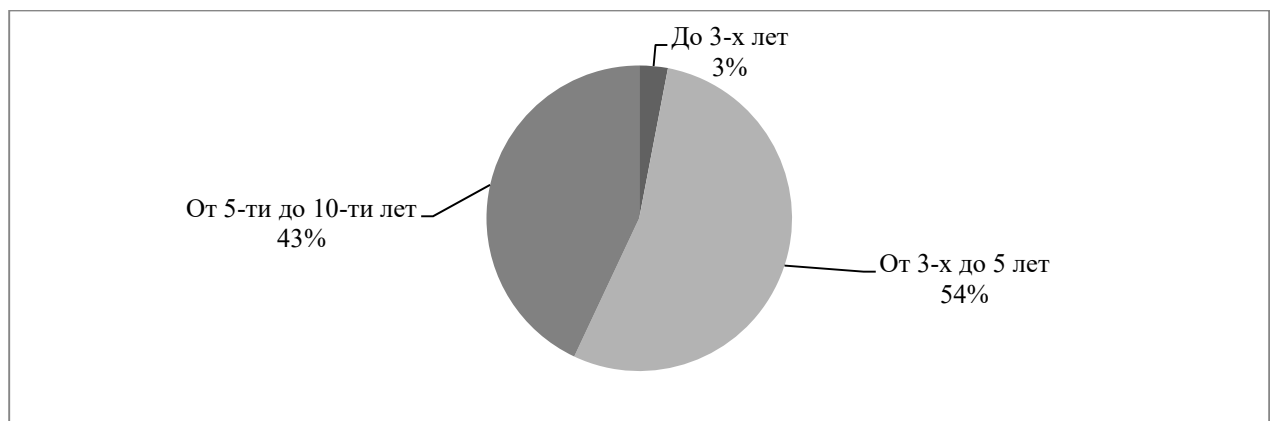


Рисунок 1.20 – Доля среднего возраста серверного оборудования в аэропортах

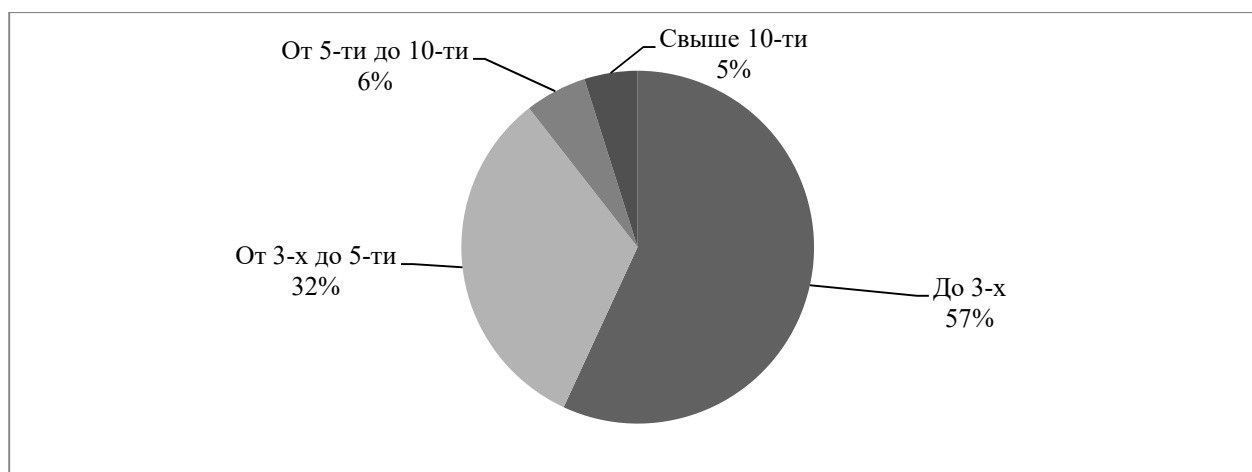


Рисунок 1.21 – Доля среднего количество серверного оборудования в аэропортах

Заметим, что приведенная на рисунке 1.21 диаграмма носит только справочный характер, так как не учитывает производительность серверов, объемы внутренней и внешней памяти, наличие кластерности и др. Текущая сложная экономическая ситуация в стране безусловно влияет и на планы развития ГА РФ. Так согласно проведенному исследованию лишь 12% аэропортов смогут увеличить выделение средств на IT-проекты (рисунок 1.22).

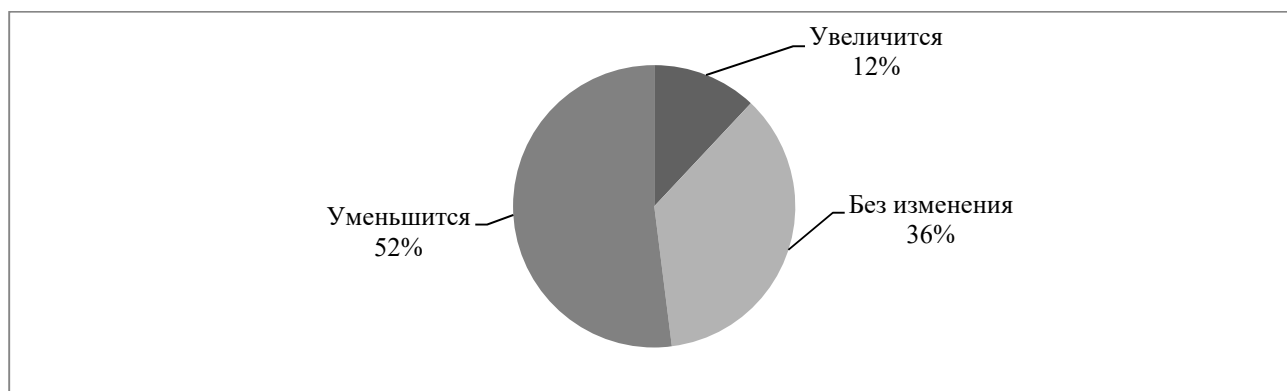


Рисунок 1.22 – Изменение бюджета на IT в 2017 году в аэропортах РФ

Эта ситуация конечно выглядит не слишком оптимистичной, т.к. стабильное развитие предприятий в нынешних реалиях возможно только при помощи постоянной модернизации технологий и инструментальных средств производства. Учитывая высокие потребности и небольшие финансовые возможности аэропортов, перед поставщиками встает задача разработки гибких условий реализации проектов и расширение партнерских программ, таких как «вендор+вендор» и «вендор+клиент».

1.5. Автоматизация процессов оперативного управления аэропортовой деятельностью на базе АС «КОБРА-2»

Для всего процесса управления эффективностью и повышения уровня показателей КРІ АП весьма важным является создание и использования эффективной системы сбора и обработки данных на основе использования надежной АС. Разработчики программных продуктов для аэропортов предлагают типовые решения по основным направлениям производственной деятельности и менеджмента [117-121]. Одно из таких решений базируется на АС «КОБРА-2» («КОБРА» – «Комплексное Обслуживание Рейсов в Аэропорту») [32, 37, 116], разработанной в РИВЦ-Пулково под руководством и при непосредственном участии диссертанта и являющейся глубокой модификацией ранее разработанной АС «КОБРА». Эта система содержит контур ОУ, достаточно легко масштабируемый для любого конкретного аэропорта и выполняемых им функций, и *обеспечивает существенную долю импортозамещения зарубежных ИТ* в отечественных аэропортах.

АС «КОБРА-2» [37] предоставляет главному оператору аэропорта инструментарий автоматизации ключевых производственных, технологических, финансово-экономических и информационных процессов с использованием интегрированного информационного обеспечения:

- обеспечивающий полноту управленческой информации для принятия оперативных решений;
- организующий эффективное взаимодействие с партнерами по бизнесу и клиентами;
- обеспечивающий возможность адаптации авиационного бизнеса к быстро меняющейся среде;
- повышающий эффективность управления предприятием и его конкурентоспособность.

Основные типовые модули и общесистемные прикладные продукты АС «КОБРА-2» представлены на рисунке 1.23.

Шрифтом ***BOLD ITALIC*** на рисунке 1.23 выделены подсистемы контура ОУ АС «КОБРА-2», подвергшиеся под руководством диссертанта наиболее глубокой модификации по сравнению с АС «КОБРА».

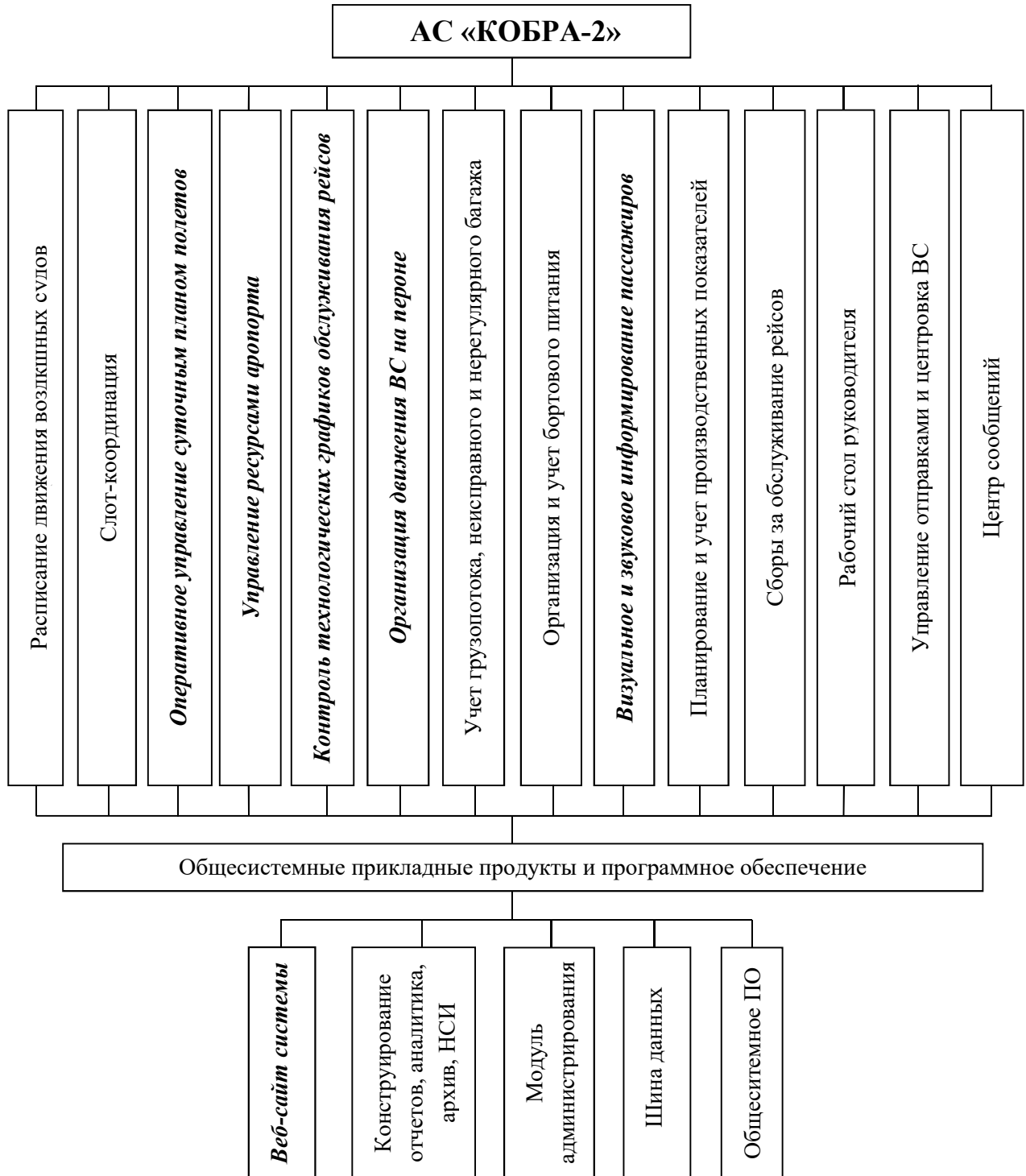


Рисунок 1.23 – Функциональная структура АС «КОБРА-2»

Типовость проектных решений АС «КОБРА-2» характеризуют ранее отмеченные масштабы ее внедрения в 20 международных, региональных, местных российских и зарубежных аэропортах, а новизну – свидетельства на программы ЭВМ по ее основным подсистемам [32-35].

Подсистемы, связанные с контуром ОУ, АС «КОБРА-2» также используется авиакомпаниями, которые проводят работы по наземному обслуживанию ВС в своих базовых аэропортах (Авиакомпания «Россия», Авиаинии Мордовы).

Кратко проанализируем основное назначение подсистем АС «КОБРА-2», детально раскрытое диссертантом в публикациях [37, 116].

П/С «Расписание движения воздушных судов» («РДС») предназначена для перспективного планирования и оперативного ведения РДС на основе запросов авиакомпаний на выполнение рейсов с учетом исторических слотов и пропускной способности аэропорта.

П/С «Слот-координация» («СЛОТЫ») предназначена для контроля и управления процессом согласования слотов и интегрирована с п/с «РДС», что позволяет автоматически сформировать РДС на сезон на основе данных согласованных слотов.

Подсистемы «РДС» и «СЛОТЫ» полностью удовлетворяют требованиям отраслевых руководящих документов [9, 13].

ПС «Оперативное управление суточным планом полетов» («СПП») предназначена для планирования и ОУ выполнением СПП АП. В рамках подсистемы обеспечены:

- автоматизированная корректировка СПП на основе формализованных телеграмм о движении ВС;
- графическое и табличное представление СПП с гибкими возможностями настройки на конкретного пользователя;
- организация АРМов специалиста по планированию полетов, диспетчеров ИСГ, СОПП, ККЗР и т.д. с возможностью совмещения произвольных функций различных АРМ в рамках одного рабочего места;

- возможность масштабирования системы.

СПП может быть представлен в виде карты, на которую наносится вся маршрутная сеть текущего плана полетов и динамически отображается расчетное местоположение ВС. В рамках подсистемы реализованы модули:

- «Учет регулярности полетов», предназначенный для учета и анализа регулярности полетов, анализа использования слотов, предоставленных авиакомпаниям, анализа качества работы служб аэропорта, составления отчетности, в том числе статистической;

- «СПП-ССЭ» и «СПП-ССО» - модули ресурсно-временной оптимизации процесса ОУ АП, основанные на разработанных эвристическом и аналитических алгоритмах выхода из ССА.

П/С «Управление ресурсами аэропорта» («УР») предназначена для оценки наличия необходимых ресурсов и возможности реализации запросов на выполнение полетов при планировании РДС и отдельных рейсов. Подсистема автоматизирует процесс управления статическими и динамическими ресурсами АП, обеспечивая расчет и контроль ресурсов аэропорта на основе РДС и ТГО рейсов (стойки регистрации пассажиров, выходы на посадку, зоны прибытия пассажиров, транспортеры выдачи багажа, взлётно-посадочные полосы, места стоянок ВС, пункты пограничного и таможенного досмотра; количество персонала и техники при обслуживании рейсов в аэропорту, планирования и ОУ другими динамическими ресурсами). В составе подсистемы реализован модуль ресурсно-временной оптимизации использования ресурсов аэропорта при ОУ выходом из ССА.

П/С «Контроль технологических графиков обслуживания рейсов» («КТГО») предназначена для оперативного контроля обслуживания ВС в АП, соблюдения ТГ подготовки ВС к вылету, размещения ВС на перронах и отслеживания их состояния.

П/С «Организация движения ВС на перроне» («Перрон») предназначена для краткосрочного планирования и ОУ размещением ВС на местах стоянок. Модуль «Мобильный перрон» в составе п/с «Перрон» обеспечивает:

ввод/вывод данных на мобильные устройства по оперативной информации по выполнению ТГО рейсов и данных по оказанным услугам; отображение текущего плана полетов АП и ТГО рейсов; информирование персонала о плане-наряде на смену.

П/С «Учет грузопотока» («Груз») предназначена для учета (сбор, хранение, корректировка) грузового потока через аэропорт на отправление и прибытие, и формирования и печати ПГВ, аналитической и статистической отчетности.

П/С «Учет неисправного и нерегулярного багажа» («Багаж») предназначена для учета, анализа и документирования данных по багажу, не прибывшему или прибывшему с неисправностями (повреждение, недостача), а также найденному багажу.

П/С «Организация и учет бортового питания» («Бортпитание») предназначена для планирования бортового питания в аэропорту (авиакомпания), организации работ по обеспечению бортовым питанием авиакомпаний в аэропорту, организации оперативного взаимодействия подразделений службы бортового питания, учета выполненных работ и использованных (возвращенных) продуктов, напитков, посуды.

П/С «Визуальное информирование пассажиров» («ВЗФ» – «ВИЗИНФОРМ») предназначена для визуального информирования пассажиров в АП о выполнении плана полетов и событиях, связанных с технологическими процессами регистрации и посадки на ВС, выдачи багажа, прилетами и вылетами ВС, задержками рейсов и их причинами и т.п.

П/С «Звуковое информирование пассажиров» (ЭД – «Электронный диктор») предназначена для автоматизированного формирования и выдачи в эфир звуковых сообщений на различных языках с использованием программной синтеза речи, генерируемых на основе СПП, ТГО рейсов и предварительно настроенных шаблонов сообщений.

П/С «Планирование и учет производственных показателей» («План») предназначена для планирования, учета и анализа производственных показателей работы АП.

П/С «Сборы за обслуживание рейсов» («Сборы») предназначена для обеспечения: расчета, учета и документирования сборов за аэропортовое и НО ВС на основе реального оперативного плана полетов АП и действующего прейскуранта цен и тарифов на услуги; ведения аэропортовых сборов, тарифов (цен) на НО ВС, условий договоров с АК.

П/С «Рабочий стол руководителя» («Руководитель») предназначена для оперативного информирования руководящего состава АП о ходе производственного процесса и реализована в виде веб-приложения, адаптированного для мобильных устройств (мобильные телефоны, планшеты). В рамках п/с реализовано: отображение СПП АП; данных по задержкам рейсов, занятости стоянок, ходу выполнения регистрации пассажиров и других технологических операций по обслуживанию рейсов; данных по занятости сотрудников различных подразделений и т.п.; схем и другой графической информации (схема перрона, графики пиковой загрузки и т.д.).

П/С «Управление отправлениями» («DCS») предназначена для: автоматического формирования списка пассажиров путем обработки телеграмм PNL и ADL, регистрации пассажиров и багажа; печати посадочных талонов и багажных бирок; формирования и рассылки стандартных телеграмм (PSM, PTM, BTM, TPM, PFS, PRL, BSM и т.д.¹); формирования и распечатки стандартной документации по рейсу; мобильной регистрации через веб-сайт и для регистрации через киоски саморегистрации. Автоматизация функции центровки ВС осуществляется посредством информационной стыковки с соответствующей подсистемой «Центровка», разработанной в Институте автоматизированных технологий воздушного транспорта (ИАТВТ).

П/С «Центр сообщений» («ЦС») предназначена для обработки сообщений, поступающих по каналам АФТН, SITATEX, электронной почте;

¹ Расшифровка этих и других ниже приведенных сообщений приведена в работе диссертанта [22].

просмотра архива телеграмм и отправки телеграмм с любого рабочего места. Производится обработка формализованных сообщений согласно ТС-95 и стандартов ИАТА, ЦРТ (APP, ДЕП, ДЛА, ФПЛ, ФЛА, ЦХГ, ЦНЛ, ПЦН, MVT, LDM, PSM, COM, PRL, BSM, PTM, BTM, PNL, ADL, SOM, SPM, SCR, ОКР, SSM, ASM, METAR, TAF, Sigmet, ATIS, UCM, CPM, SCM, NOTAM); формирование стандартных и произвольных сообщений с использованием специального конструктора.

Веб-сайт АС «КОБРА-2» предназначен для быстрого и легкого доступа к наиболее часто запрашиваемой информации на русском и английском языках с возможностью подключения большого количества пользователей без установки программного обеспечения на каждое клиентское рабочее место.

П/С «Конструктор отчетов» предназначена для формирования и печати справок по РДС и СПП в вариантах фиксированных и произвольных отчетных форм с учетом периода с (xx.yy) по (zz.ww) времени (UTC, местного или базового), аэровокзала, направления, а также с возможностью фильтрация данных при дополнительных ограничениях: тип ВС; авиакомпания; аэропорт; вид и класс расписания; вид регулярности; вид движения.

П/С «Аналитическая отчетность» предназначена для формирования отчетности по выполнению рейсов, коммерческой загрузке, учету задержек, сверхнормативном простое. В рамках п/с реализована возможность контроля незакрытых рейсов, т.е. рейсов, по которым отсутствуют те или иные параметры (фактические времена выполнения рейса, код задержки и т.п.).

П/С «Архив пассажиров» («Архив») предназначена для сбора информации по пассажирам и багажу, включая трансферных, ведения неограниченного архива по обслуженным пассажирам, поиска данных, формирования различных справок и отчетов. Архив создается автоматически путем обработки стандартных сообщений форматов PNL, ADL, PRL, BSM, BTM, PTM, поступающих из различных АС бронирования и продажи услуг ВТ, и систем регистрации пассажиров и багажа.

П/С «Нормативно-справочная информация» («НСИ») предназначена для ведения справочников, необходимых для работы системы. НСИ включает в себя справочники авиакомпаний, городов, аэропортов, типов ВС, ресурсов аэропорта, причин задержек ВС, валют, курсов валют ЦБ РФ и т.д. Отдельный модуль обеспечивает ведение аэропортовых сборов, тарифов (цен) на наземное обслуживание ВС, условий договоров с авиакомпаниями.

П/С «Администрирование» предназначена для распределения полномочий в работе с АС «КОБРА-2» и обеспечивает автоматизированную: раздачу прав доступа пользователям; выдачу статистики запусков; настройку телеграмм при использовании п/с «ЦС».

П/С «Шина данных» («ШД») предназначена для интеграции АС «КОБРА-2» с другими ИС аэропорта. Интеграция осуществляется посредством стандартного XML-файла, содержащего все реквизиты рейсов. Формирование файла может производиться оператором или автоматически по расписанию или по событию. Файл может быть отправлен по электронной почте, выложен в сетевую папку либо FTP, по TCP/IP или HTTP. В подсистеме обеспечена возможность стыковки с АС «Центровка» (ИАТ ВТ), Интернет-сайтом аэропорта (справки по расписанию, табло прилетов/вылетов).

Для автоматизации функции по обеспечению экипажей ВС аэронавигационной и метеорологической информацией в составе АС «КОБРА-2» предлагается комплекс программ «Планета-Брифинг», разработанный партнером «РИВЦ-Пулково» – компанией ООО «Фирма «НИТА» [Нита 113].

Функции ОУ аэропортовой деятельностью в АС «КОБРА-2» обеспечиваются следующими подсистемами (рисунок 1.23): «СПП»; «Контроль ТГО ВС»; «УР»; «Мобильный перрон»; «Перрон»; веб-сайт «КОБРА Онлайн».

Выбор указанных выше направлений автоматизации функций и процессов ОУ аэропортом в АС «КОБРА-2» базировался на проведенных анкетных обследованиях по приоритетам автоматизации аэропортов (см. рисунки 1.7-1.22 и таблицу 1.4). Проведенный анализ функциональной полноты подсистем АС «КОБРА-2» показал, что они не уступают зарубежным аналогам,

но обходятся аэропортам при внедрении и эксплуатации примерно 2-10 раз дешевле, что подтверждено Актом внедрения РИВЦ «Пулково». Анализ проводился при сопоставлении функционально близких подсистем, внедренных в различных сочетаниях в российских аэропортах (таблица 1.5), где C_z/C_K – усредненное соотношение цены зарубежных подсистем и п/с АС «КОБРА-2».

Таблица 1.5 – Сопоставление по стоимости зарубежных подсистем и подсистем АС «КОБРА-2»

№	Зарубежные подсистемы-аналоги	Подсистемы АС «КОБРА-2»	C_z/C_K
1	GroundStar AODB (разработчик Inform, Германия)	Оперативное управление суточным планом полетов	3-4
2	SCORE (разработчик PDC, Дания)	Слот-координация	4-5
3	GroundStar RMS (разработчик Inform, Германия)	Управление ресурсами	20-30
4	AirportHub (разработчик SITA, Швейцария)	Центр сообщений	1.3-3
5	UltraFIDS (разработчик Ultra, Великобритания)	Визинформ и Электронный диктор	3-5
6	Maestro DCS Local (разработчик SITA, Швейцария)	Регистрация пассажиров	3-5
7	Invoice (разработчик RESA, Франция)	Сборы за обслуживание рейсов	4-5

Функциональное взаимодействие подсистем и информационные потоки АС «КОБРА-2» при оперативном управлении аэропортовой деятельностью, включая случаи ССА, представлено на рисунке 1.24.

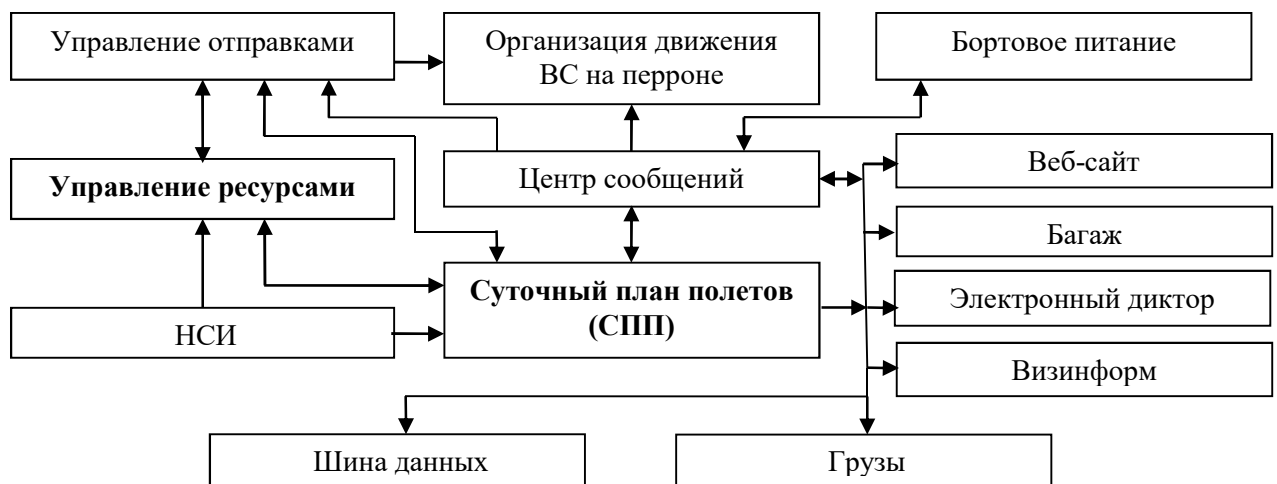


Рисунок 1.24 – Функциональное взаимодействие подсистем АС «КОБРА-2» и информационные потоки при ОУ аэропортовой деятельностью

Регулирование процессов оперативного управления в случае ССА осуществляется путем соответствующей корректировки СПП и порядка использования статических и динамических ресурсов аэропорта, т.е. основными подсистемами АС «КОБРА-2», обеспечивающими автоматизацию процессов ОУ в ССА являются подсистемы «СПП» и «УР».

Выводы по главе 1

1. На базе классификатора нарушений регулярности полетов ВС ГА произведена выборка значимых нарушений по вине различных служб аэропорта, в наибольшей степени влияющих на возникновение ССА.

2. Проведен анализ влияния задержек отправления ВС на показатели регулярности полетов ВС и их тренды как в целом по аэропортам ГА, так и примеры по аэропортам отдельных классов.

3. Проанализированы управляемые ресурсы аэропорта, обобщенная структура оперативного штаба главного оператора и схема его взаимодействия с внешними организациями при ССА.

4. На основе полученных данных анкетного опроса руководителей IT-аэропортов выявлены приоритеты развития автоматизированного и информационного обеспечения деятельности аэропортов, разработана и внедрена АС «КОБРА-2» для комкомплексного обслуживания рейсов в штатных, нештатных и сбойных ситуациях.

5. Показано, что разработанная под руководством диссертанта и широко применяемая для ОУ аэропортом АС «КОБРА-2», обеспечивает существенную долю импортозамещения зарубежных IT, а ее подсистемы в разы дешевле близких по функциональному назначению зарубежных подсистем.

Глава 2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РЕСУРСНО-ВРЕМЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОЧЕРЕДНОСТЬЮ ОТПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ И РАБОТОЙ БРИГАД В СБОЙНОЙ СИТУАЦИИ АЭРОПОРТА

2.1. Диаграмма ресурсно-временной оптимизации процесса оперативного управления аэропортом в сбойной ситуации

Моменты прилета Q_j ($j = 1, \dots, m$) и вылета T_i ($i = 1, \dots, n$) плановых и задержанных рейсов, и решаемые при этом задачи ресурсно-временной оптимизации процессов ОУ в ССА отображены на диаграмме (рисунок 2.1).

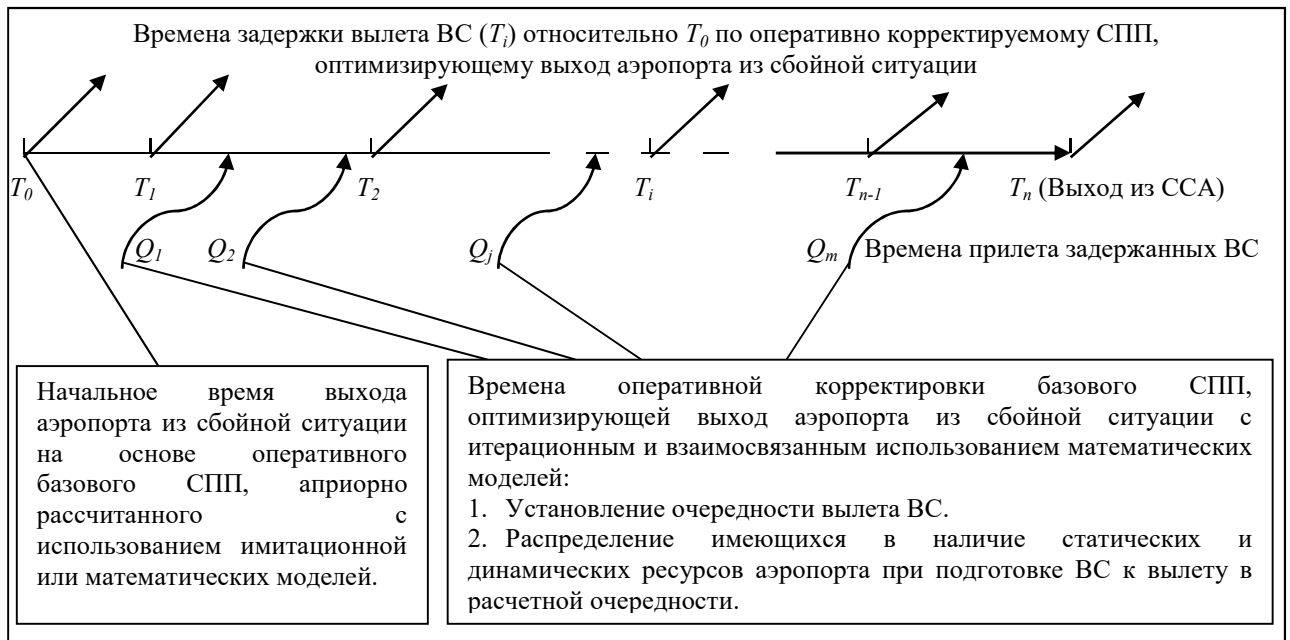


Рисунок 2.1 – Диаграмма ресурсно-временной оптимизации процессов ОУ в ССА

Аэропорт (орган ОУ главного оператора аэропорта) принимает одну из стратегий управления очередностью вылета прибывших задержанных и плановых рейсов в момент открытия:

- прибывшие плановые и задержанные рейсы отправляются по РДС;
- прибывшие плановые рейсы отправляются по РДС, а прибывшие задержанные рейсы устанавливаются в общую очередь вылета вместе с задержанными к вылету рейсами в аэропорту;

- все прибывающие и задержанные рейсы устанавливаются в общую очередь отправляемых рейсов.

Корректировка планового СПП осуществляется по выбранным главным оператором критериям эффективности с применением эвристического алгоритма, математических или имитационных моделей.

В момент времени T_0 принимается решение об открытии аэропорта. Этот момент времени соответствует моменту выхода из ССА. До момента T_0 органом оперативного управления (обычно ПДСП) корректируется плановый СПП на всю «глубину» ССА без учета прибывающих плановых и задержанных рейсов. При этом решаются оптимизационные задачи установления очередности вылета ВС и распределения имеющихся и, при необходимости, дополнительных ресурсов для обслуживания рейсов в рассчитанной очередности. Моменты времени T_1, \dots, T_n – моменты отправления плановых и задержанных рейсов по скорректированному СПП. Если в какой-то момент времени Q_i приходит новый рейс, то в этот же момент осуществляется новая корректировка СПП. Далее этот процесс повторяется до полного выхода из ССА (момент T_n) и перехода на работу аэропорта по плановому СПП.

Диаграмма (рисунок 2.1) лежит в основе наглядного представления сущности аналитического и имитационного методов решения задач ресурсно-временной оптимизации.

Основу аналитических методов, рассматриваемых в настоящей главе, составляют:

- модели, базирующиеся на эвристической и оптимизационной постановках задач ОУ выходом из ССА;
- методы решения оптимизационных задач;
- модули автоматизации оптимизационных расчетов.

2.2. Алгоритм определения очередности отправления воздушных судов в сбойных ситуациях аэропорта

В разработанном модуле СПП-ССЭ при ОУ выходом из ССА приняты правила НПП ГА 85 [12], определяющие что при взлете имеют преимущества (приоритеты) ВС:

- выполняющие задания по охране интересов государства;
- выполняющие поисково-спасательные, аварийно-спасательные работы и задания по оказанию срочной медицинской помощи;
- выполняющие полеты в составе группы;
- с ограниченным временем работы двигателей на земле;
- с ограниченным запасом топлива для выполнения задания;
- с пассажирами;
- более скоростные.

При обслуживании рейсов приоритеты выстраиваются в следующем порядке: литерные; регулярные; бизнес; чартерные и т.п.

Техническое обслуживание ВС, прибывших на запасной аэродром, производится согласно очередности (без указания времени вылета), установленной диспетчером ПДСП в соответствии с таблицей приоритетности рейсов, а отправление согласно плана, утвержденного руководителем оперативного штаба.

Удовлетворительность решения задачи установления очередности самолетовылетов оценивает руководитель оперативного штаба. Действия всех служб и их должностных лиц регламентированы соответствующими положениями и должностными инструкциями. Результатом этих действий укрупнённо является:

- оперативная корректировка СПП и оперативное информирование соответствующих служб;
- мобилизация необходимых ресурсов для работы в ССА по скорректированному СПП, подготовка и выделение дополнительных ресурсов;

- обеспечение рациональной расстановки ВС на перроне;
- принятие решения о возобновлении полетов по оперативно скорректированному СПП и др.

На рисунке 2.2 приведен разработанный с участием диссертанта и реализованный в АС «КОБРА-2» в составе модуля «СПП ССЭ» подсистемы «СПП» эвристический алгоритм операций по ОУ самолетовылетами в сбойных ситуациях [28].

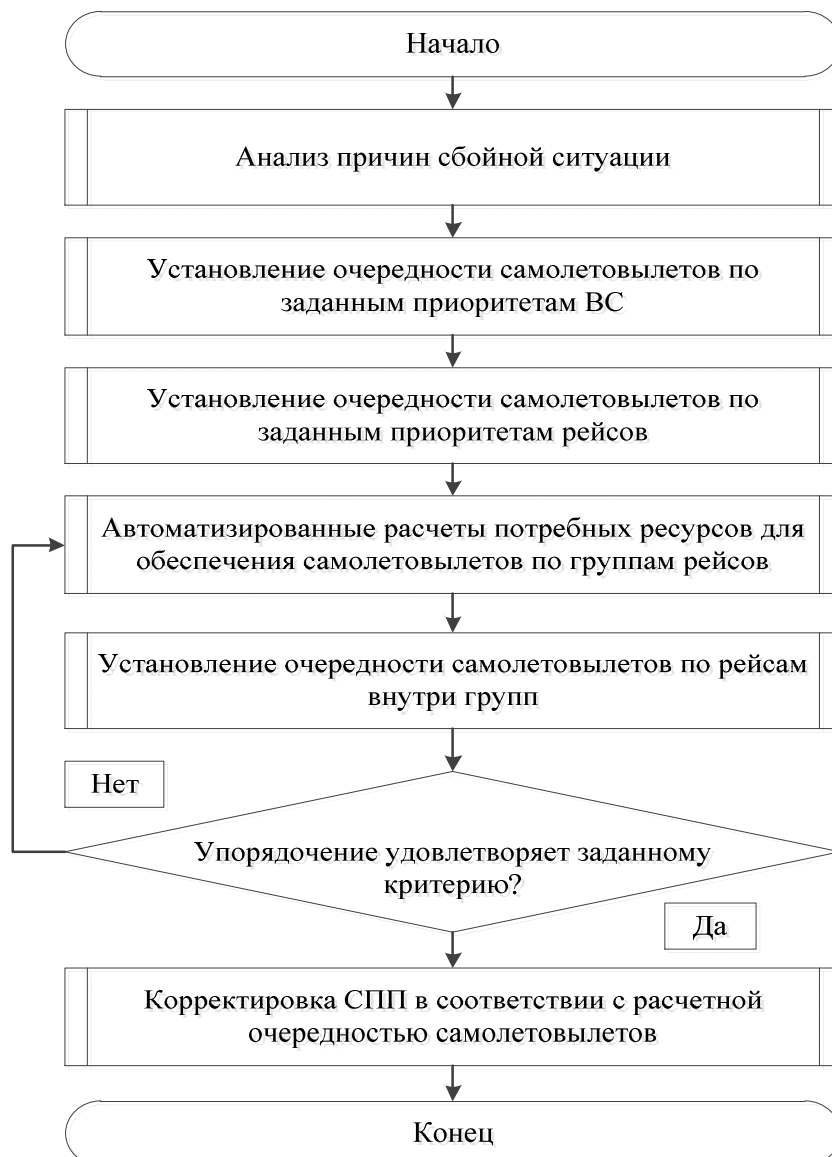


Рисунок 2.2 – Эвристический алгоритм поиска решения по упорядочению самолетовылетов в сбойных ситуациях

В этом алгоритме установление очередности самолетовылетов по рейсам внутри групп осуществляется по вышеопределенным критериям и соответствующим шаблонам.

Для решения задачи по оперативному управлению самолетовылетами с применением инструментария АС «КОБРА-2» диспетчерами ПДСП выбираются критерии упорядочения, сводящиеся к установленным шаблонам, применение которых в общем случае уменьшает (но не оптимизирует):

- суммарное время ожидания вылета пассажиров всех рейсов за счет упорядочивания самолетовылетов по количеству пассажиров на каждом рейсе, причем первоочередные – рейсы с наибольшим количеством пассажиров;
- суммарные потери авиакомпаний и аэропорта путем существенного сокращения времени на принятие решений по установлению очередности вылета самолетов.

Реализация алгоритма осуществляется в подсистеме «СПП-ССЭ», который обслуживает АРМ диспетчера по управлению отправлениями ВС и АРМ сменного руководителя ПДС. При этом в модулях АС «КОБРА-2» не решаются задачи упорядочения отправления ВС в условиях ССА, базирующиеся на применении методов оптимизации указанных выше критериев эффективности. Такие задачи относятся к теории расписаний; их постановка и выбор методов решения и составляет существо дальнейших исследований в настоящей работе.

2.3. Общие принципы разработки аналитического метода ресурсно-временной оптимизации очередности подготовки воздушных судов к отправлению при открытии аэропорта

Как отмечено в главе 1, процессы выхода из ССА исследовались на имитационных моделях, но не исследовались в аналитической постановке, которая позволяет не только анализировать процессы, но и оптимизировать решения.

Постановка задач основывается на системном подходе, так как при управлении в организационных системах поведение составляющих их элементов взаимосвязано. Эта взаимосвязь может быть представлена в виде операционных моделей, которые, хотя и являются сложными с математической точки зрения, но имеют простую структуру вида [16, 17]:

$$K = \min f(X_i, Y_j),$$

где K – заданный критерий эффективности;

X_i – управляемые переменные;

Y_j – заданные исходные данные (переменные и константы), не поддающиеся управлению, но влияющие на K ;

f – функция, задающая соответствие между K и X_i, Y_j .

Принятый критерий эффективности конкретной очередности подготовки ВС к отправлению существенно влияет на принятие окончательного решения. Однако, для математического, алгоритмического и программного обеспечений это не является существенным, поскольку подсчёт любого критерия труда не представляет никаких сложностей. Приведем возможные критерии.

Время окончания обслуживания последнего ВС из числа всех n задержанных самолётов. Заметим, что если ресурсов аэропорта достаточно, то очередность отправления не влияет на суммарное время обслуживания всех ВС в ССА, так как сокращение времени ТО в отличие от установленного ТГО не допустимо, т.е. от перемены порядка обслуживания ВС их суммарное время обслуживания не меняется.

Однако, даже в случае избытка ресурсов, на общее время подготовки всех ВС к отправлению в ССА существенно влияют следующие факторы: месторасположения ВС на перроне, влияющее на время перемещения бригад между ними; стохастический характер процессов обслуживания ВС. Таким образом, применение данного критерия вполне правомерно, как в выше описанных случаях, так и в случае нехватки имеющихся в распоряжении главного оператора ресурсов.

Суммарные человеко-часы, проведенные в аэропорту пассажирами всех задержанных рейсов до вылета. Это социальные потери.

Суммарные потери, понесенные авиакомпаниями и аэропортом за задержку всех рейсов до выхода из ССА.

Комплексные потери, выражаемые в виде функциональной зависимости от таких показателей, как время задержки, число пассажиров рейса, «весомость» задержки конкретного рейса и пр.

Список может быть увеличен, без какого-либо существенного изменения в общем процессе оптимизации. Все возможные критерии легко программируются, так что можно всегда выбрать какой-то из них, или использовать разные для сравнения получаемых результатов.

Выбор критерия осуществляется главным оператором аэропорта.

Все такого рода критерии легко вычисляются на основе данных массива *График состояния ресурсов graphic*, который будет описан далее в главе 3.

Проблема формализации, рассматриваемая в данной работе, ***является весьма сложной***. Обычно решение подобных проблем осуществляется поэтапно. Вначале рассматриваются задачи более высокого уровня, далее – последующих уровней. В нашем случае – это двухуровневая задача.

Общая последовательность действий при дальнейшем аналитическом исследовании разбивается на следующие этапы (*данная глава и глава 3*):

1) Постановка и выбор метода решения задач ресурсно-временной оптимизации, первой из которых является задача расчета очередности подготовки ВС к отправлению при выходе из ССА, и второй – задача составления графиков работы бригад по обслуживанию ВС при заданной очередности отправок.

2) Автоматизация расчетов, проверка и оценка модели на численных примерах.

Описываемый далее метод разработан диссертантом в [29, 31], опираясь на классические работы [47, 50, 56, 65, 75, 79, 83, 94-96, 103-105, 11, 114].

2.4. Постановка задачи ресурсно-временной оптимизации очередности подготовки воздушных судов к отправлению при открытии аэропорта

Исходные данные для постановки задачи. Имеется m ресурсов аэропорта, обеспечивающих вылеты рейсов, $i = 1, \dots, m$. По каждому ресурсу i известна функция $g_i(t)$, указывающая объём располагаемого ресурса в момент времени t . Также имеется n ВС, ожидающих вылета, $j = 1, \dots, n$. Для ВС j и ресурса i указан интервал времени $(t_{j,i}, t_{j,i})$ после начала подготовки к вылету, когда этот ресурс требуется, а также функция $h_{j,i}(t)$, указывающая объём потребляемого ресурса в момент времени t после начала обслуживания ВС. Кроме того, для каждого j -го ВС задан «штраф» c_j за единицу времени задержки вылета после открытия аэропорта.

Требуется для каждого j -го ВС определить время начала его подготовки к вылету x_j при необходимом условии, чтобы перерывы в подготовке ВС к рейсу по причине недостаточности ресурсов, отсутствовали.

Для дальнейшего введём символ Кронекера $\delta(z) = 1$, if $z \geq 0$, and 0 otherwise. Кроме того в рассматриваемом интервале времени определим моменты $\{\tau_s\}$, для которых будет проверяться условие на достаточность ресурсов. Число таких точек обозначим L .

Запишем математическую постановку задачи. Найти неотрицательные переменные x_j , $j = 1, \dots, n$, минимизирующие функцию цели (суммарные потери за задержку отправления рейсов в ССА):

$$f(x) = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (2.1)$$

при ограничениях:

$$\sum_{j=1}^n \delta(\tau_s - x_j - t_{j,i}) (\delta(x_j + t_{j,i} - \tau_s)) h_{j,i}(\tau_s - x_j) \leq g_i(\tau_s), \quad i=1, \dots, m, \quad s=1, \dots, L \quad (2.2)$$

Прокомментируем приведенную формулу 2.2. Если $\delta(\tau_s - x_j - t_{j,i}) = 1$ и $\delta(x_j + t_{j,i} - \tau_s) = 1$, то это значит, что $x_j + t_{j,i} \leq \tau_s \leq x_j + t_{j,i}$, т.е. что в момент времени τ_s i -ый ресурс используется для обслуживания j -го ВС. При этом i -ый ресурс используется в объёме $h_{i,j}(\tau_s - x_j)$. Сумма по всем обслуживаемым ВС j не должна превышать располагаемого i -го ресурса $g_i(\tau_s)$ в этом момент времени.

2.5. Формулирование задачи ресурсно-временной оптимизации очерёдности самолетовылетов при выходе из сбйной ситуации аэропорта в виде задачи целочисленного программирования

Как отмечено ранее, сформулированная задача в постановке 2.1 при ограничениях 2.2 относится к теории расписаний.

В теории расписаний рассматриваются работы, подлежащие выполнению. В нашем конспекте таковыми являются ВС, ожидающие вылета. Каждая работа включает ряд операций, у нас – потребляемые ресурсы. Операции выполняются машинами, специализированными на определённые операции. В нашем контексте это имеющиеся ресурсы: бригады, средства механизации, места стоянки ВС и пр. Математическое описание становится проще, если рассматривать эти ресурсы одновременно, как это сделано у нас. В дальнейшем будет введено понятие операции, как процесс использования определённого ресурса (или ресурсов) при обслуживании ВС.

Задачи теории расписаний являются NP -полными задачами [57, 112]. Это означает, что не существует точных методов и алгоритмов их решения, а потребное число операций растёт быстрее полиномиальной зависимости от числа неизвестных n . В этом случае применяются эвристические, комбинаторные и другие методы, дающие субоптимальные решения, т.е. решения близкие к оптимальным.

Для выбора метода решения переформулируем задачу (2.1, 2.2) в виде задачи целочисленного программирования. В первую очередь отметим, что решение $x = (x_1, \dots, x_n)$ этой задачи взаимно-однозначно определяет очередность принятия ВС на предполётное обслуживание. Действительно, пусть $\kappa(j)$ есть порядковый номер j -го ВС, согласно которому он принимается на обслуживание. Обратная функция указывает номер ВС, который принимается κ -ым: $j(\kappa) = \kappa^{-1}(j)$. Сама очередность номеров ВС, с которой они принимаются на обслуживание, будет задаваться вектором $J = (j(1), \dots, j(n))$. При этом сама последовательность времён принятия на обслуживание $\underline{x} = (x_{j(1)}, \dots, x_{j(n)})$ будет упорядоченной.

Множество значений вектора J - это множество всех перестановок чисел $\Omega = 1, 2, \dots, n$. Теперь рассматриваемую задачу можно сформулировать так:

Найти перестановку $J = (j(1), \dots, j(n))$, минимизирующую функцию цели

$$f(x) = \sum_{k=1}^n c_{j(k)} x_{j(k)} \quad (2.3)$$

при ограничениях:

$$\sum_{k=1}^n \delta(\tau_s - x_{j(k)} - t_{j(k)i}) \delta(x_{j(k)} + t_{j(k)i} - \tau_s) h_{j(k)i}(\tau_s - x_j) \leq g_i(\tau_s), \quad i=1, \dots, m, \quad s=1, \dots, L. \quad (2.4)$$

Для большинства из ниже перечисленных методов очередная рассматриваемая n -перестановка $J = (j(1), \dots, j(n))$ формируется последовательно по шагам. На каждом шаге определяется номер ВС, который будет обслуживаться следующим. Когда вся n -перестановка $(j(1), \dots, j(n))$ сформирована, для неё подсчитывается критерий эффективности. Если он оказывается лучше ранее достигнутого рекорда f^* , то полученная перестановка запоминается и рекорд обновляется. Затем аналогичным образом формируется новая перестановка. Правила, по которым определяется следующий элемент перестановки, определяются конкретным применяемым методом.

Теперь остановимся на том, каким образом вычисляется время $x_{j(k)}$ принятия на обслуживание ВС, если он является k -ым в перестановке $J = (j(1), \dots, j(n))$. С этой целью для каждого ресурса формируется временной график его использования. График описывается L -мерным вектором G_i , в котором элемент $G_{i,s}$ равен свободному i -му ресурсу в момент времени τ_s . Для начального момента времени $G_{i,s} = g_i(\tau_s)$.

Ресурса i -го типа будет достаточно для начала обслуживания j -го ВС в момент времени x_j , если

$$G_{i,s} \geq h_{j,i}(\tau_s - x_j), \quad \forall s: x_j + t_{-j,i} \leq \tau_s \leq x_j + t_{j,i}. \quad (2.5)$$

Если это условие соблюдается для всех видов ресурса, то в момент времени x_j ВС может быть принят на обслуживание. Минимальное из таких значений и принимается за начало обслуживания j -го ВС x_j .

После определения времени x_j осуществляется корректировка свободных ресурсов всех видов. Она осуществляется для ресурса i -го вида так:

$$G_{i,s} = G_{i,s} - h_{j,i}(\tau_s - x_j), \quad \forall s: x_j + t_{-j,i} \leq \tau_s \leq x_j + t_{j,i}. \quad (2.6)$$

Для решения подобных задач используются:

- *метод ветвей и границ;*
- *генетические алгоритмы;*
- *последовательный поиск с горизонтом просмотра;*
- *метод проб и ошибок.*

Первые три метода примерно равноценны по эффективности (числу переборов перестановок) [31, 64, 97, 98, 102, 108-110]. Метод проб и ошибок – наименее эффективный из других, поэтому он далее не рассматривается.

Наиболее эффективными являются три первых метода. Ниже описываются эти методы, модифицированные для условий рассматриваемой задачи.

2.6. Выбор и адаптация метода последовательного поиска с горизонтом просмотра для решения оптимизационной задачи

Метод ветвей и границ – это метод перебора всех n -перестановок (возможных решений) с отсечением подмножеств явно неперспективных, неоптимальных перестановок (решений) [56, 111]. В процесса перебора рассматриваются не только n -перестановки, но и r -перестановки с r числами ($r < n$). Каждая перестановка соответствует вершине ориентированного *дерева* [47, 60)]. Корень дерева – пустая вершина, не соответствующая никакой перестановке. Из корня ведут дуги к вершинам, соответствующим 1-перестановкам, от последних – к 2-перестановкам т.д. Вершины, соответствующие n -перестановкам, называются *концевыми*. Концевыми являются также вершины, соответствующие r -перестановкам ($r < n$), если дальнейшее формирование перестановки нецелесообразно из соображения получающегося критерия. Из концевых вершин никакие дуги не выходят. В результате в дереве имеются ветви (пути), ведущие от корня к концевым вершинам.

Процедура формирования новой перестановки осуществляется по шагам. В каждый момент известно оптимальное значение функции цели, *рекорд* f^* , полученный до данного времени, а также соответствующая ему n -перестановка. Начальное значение рекорда полагается очень большим, например, бесконечности. На r -ом шаге фиксированы значения переменных x_1, x_2, \dots, x_r для первых r самолётов, т.е. фиксирована r -перестановка (x_1, x_2, \dots, x_r) , и соответствующая подсумма $\sum_{j=1}^r c_j x_j$ функции цели (2.3).

На следующем шаге, в первую очередь, оценивается наилучшая сумма $\sum_{j=r}^n c_j x_j$ для оставшихся ВС. Если сумма этой оценки и подсуммы больше рекорда, то дальнейшее продолжение этой ветви прекращается и осуществляется переход на формирование новой n -перестановки. В противном

случае выбирается очередной $(r + 1)$ -ый элемент перестановки, не присутствующий в уже имеющейся n -перестановке. Обычно выбирается наименьший из возможных номеров. Если имеется несколько возможных номеров для включения, то рассматриваемая вершина наделяется меткой, говорящей о том, что тут возможны и другие ветвления. Сама вершина считается точкой ветвления.

Эта процедура продвижения по ветви продолжается до тех пор, пока не будет сформирована концевая вершинами или не обнаружена бесперспективность дальнейшего продвижения по ветви. В обоих случаях переходят к последней точке ветвления и т.д.

Весь процесс формирования перестановок завершается, когда не останется точек ветвления. Зафиксированный рекорд и отвечающая ему перестановка дают оптимальное решение.

В методе ветвей и границ теоретически рассматриваются все n -перестановки. Обсудим, как они генерируются и каким образом оценивается на k -ом шаге ($k < n$) целесообразность дальнейшего рассмотрения данной перестановки.

Известно много алгоритмов перечисления всех перестановок из n чисел $1, 2, \dots, n$ [65, 79]. Опишем один из простейших алгоритмов, основанный на рекурсивном вычислении факториала $n! = n(n-1)!$ Оператор *Permut*(n) (листинг этого и других операторов приведен Приложении А) вычисляет $n!$, используя такую рекурсию. Дадим пояснения к этому оператору.

Все перестановки представлены в виде столбцов матрицы R . Если $n = 2$, то результат выдаётся сразу. Если $n > 2$, то используется рекурсия путём обращения к тому же оператору с заменой аргумента n на $n-1$. Полученные $(n-1)$ перестановки записываются как столбцы матрицы P размера $(n-1) \times M$, где $M = (n-1)!$ Из каждого столбца матрицы P (каждой $(n-1)$ -перестановки) формируется n n -перестановок. Для этого организуется цикл по столбцам матрицы P . Очередной рассматриваемый столбец матрицы P обозначается вектором V . Новая n -перестановка получается вписыванием нового номера n в

качестве значения её i -компоненты, $i = 1, \dots, n$. Остальные компоненты совпадают со старыми значениями. Наконец, целочисленная переменная j определяем номер столбца новой матрицы, в который вписывается сформированная перестановка.

Важнейшим элементом метода ветвей и границ является прекращение дальнейшего движения по элементам рассматриваемой перестановки J , вызванное тем, что рассматриваемый критерий эффективности перестановки заведомо хуже (например, больше) уже ранее достигнутого значения критерия C^* . Это происходит следующим образом. На очередном, например, k -ом шаге формирования перестановки подсчитывается значение составляющей критерия, относящееся к уже имеющейся части перестановки $J^{(k)}$. Обозначим его $C(J^{(k)})$. Далее, пусть установлено, что остающаяся часть перестановки даёт вклад в критерий, не меньший, чем $\underline{C}(J^{(k)})$. Тогда формируемая перестановка будет иметь критерий, не менее, чем $C(J^{(k)}) + \underline{C}(J^{(k)})$. Если это больше, чем C^* , то дальнейшие шаги не производятся, точка $J^{(k)}$ объявляется *концевой точкой* дерева перестановок.

Краеугольным элементом здесь является наличие эффективного метода оценивания нижней границы увеличения критерия, даваемого остающейся частью перестановки. Чем раньше будет обнаружена неэффективность формируемой перестановки, тем более быстродействующим будем перебор перестановок.

В целочисленном программировании такие нижние значения критериев часто устанавливаются путём отбрасывания условия целочисленности переменных и перехода к задаче линейного программирования. В нашем случае (критерий 2.3) такой подход невозможен и следует искать другие варианты оценивания. Одних из них заключается в следующем.

Для каждого из ресурсов устанавливается нижняя граница критерия, которая бы получалась, если другие ресурсы не принимать во внимание. Обозначим её $\underline{C}(J^{(k)}, i)$ для i -го ресурса и имеющейся части перестановки $J^{(k)}$. Тогда полагаем

$$\underline{C}(J^{(k)}) = \min_i \{ \underline{C}(J^{(k)}, i) \}. \quad (2.7)$$

Проиллюстрируем этот подход на простом примере, описанном в литературе [50 Теорема 3.10]. Ниже в скобках приведены термины-аналоги, используемые в этом источнике. Итак, рассматривается один ресурс (одна машина), n ВС (работ), а также для j -го ВС, $j = 1, \dots, n$: длительность использования ресурса Δ_j и потери c_j за единицу времени задержки вылета после открытия аэропорта. Дополнительно предполагается, что величина ресурса неизменна и при подготовке каждого ВС используется полностью, т.е. $g_i(t) = h_{j,i}(t) = 1$. Далее, поскольку рассматривается один ресурс, то ограничения на начало использования ресурса отсутствуют – каждое ВС может быть принят на обслуживание сразу, т.е. $\underline{t}_{j,i} = 0$, $t_{j,i} - \underline{t}_{j,i} = \Delta_j$.

Упомянутая Теорема 3.10 утверждает, что минимизация суммарных потерь достигается в случае, когда ВС принимаются на обслуживание в порядке увеличения отношения Δ_j/c_j , т.е. перестановка $J = (j(1), \dots, j(n))$ будет оптимальной в классе всех перестановок Ω , если

$$\frac{\Delta_{j(1)}}{c_{j(1)}} \leq \frac{\Delta_{j(2)}}{c_{j(2)}} \leq \dots \leq \frac{\Delta_{j(n)}}{c_{j(n)}}. \quad (2.8)$$

Эти минимальные потери будут такими:

$$C(J, \cdot) = \sum_{\eta=1}^n c_{j(\eta)} (\Delta_{j(1)} + \dots + \Delta_{j(\eta)}) \quad (2.9)$$

В нашем случае сформулированное правило относится не ко всем ВС, а только к ВС, начиная с $(k+1)$ -го в рассматриваемой перестановке J , т.е. к перестановке $J^{(k)}$. Для них минимальный суммарные потери составят

$$\underline{C}(J^{(k)}, \cdot) = (\Delta_{j(1)} + \dots + \Delta_{j(k)}) \sum_{\eta=1}^k c_{j(\eta)} + \sum_{\eta=k+1}^n c_{j(\eta)} (\Delta_{j(k+1)} + \dots + \Delta_{j(\eta)}) \quad (2.10)$$

Подсчитав таким образом потери $\underline{C}(J^{(k)}, i)$ для всех видов имеющихся ресурсов $i = 1, \dots, m$, по формуле (2.7) оцениваем минимальные потери для ещё

нерассмотренных номеров перестановки. Это позволяет принять решение о продолжении или окончании её рассмотрения.

Генетический алгоритм [97, 102] представляют собой один из методов случайного поиска, применяемых для нахождения решения, оптимизирующего функцию цели $f(x)$ при некоторых ограничениях на x . В процессе работы алгоритм оперирует со многими решениями, являющимися лучшими к данному моменту поиска. Множество таких решений называется *поколением*. На этой основе пытаются получить новое хорошее решение, путём «скрещивания» двух имеющихся решений. Изложим соответствующую процедуру на примере булевого вектора x , состоящего из нулей и единиц.

Обозначим Ω текущее поколение, т.е. множество решений, имеющихся к данному моменту поиска. Множество элементов Ω обозначим K , оно остаётся постоянным. В теории генетических алгоритмов элементы поколения (элементы Ω) называются *хромосомами*. Основными являются *операция эволюции (селекции)* и *генетические операции*. Операция *селекции* формирует новое поколение. Генетическими операциями являются *скрещивание* и *мутация*.

Операция *селекции* заключается в отборе хромосом из имеющегося поколения в новое поколение. Организуется цикл по числу хромосом в имеющемся поколении K . На каждом шаге отбирается одна хромосома. Хромосома $x^{(v)}$ отбирается с вероятностью (при минимизации функции цели)

$$p_v = \frac{1}{f(x^{(v)})} \left(\sum_{\psi=1}^K \frac{1}{f(x^{(\psi)})} \right)^{-1}. \quad (2.11)$$

Алгоритм отбора следующий. Пусть $F_0 = 0$,

$$F_v = \sum_{\psi=1}^v p_\psi = \left(\sum_{\psi=1}^K \frac{1}{f(x^{(\psi)})} \right)^{-1} \sum_{\psi=1}^v \frac{1}{f(x^{(\psi)})}, \quad v = 1, \dots, K. \quad (2.12)$$

На каждом шаге цикла вырабатывается случайное число R , равномерно распределённое в интервале $(0, 1)$. Хромосома $x^{(v)}$ отбирается, если

$$F_{v-1} < R \leq F_v, \quad v=1, \dots, K.$$

Отметим, что одна и та же хромосома может быть отобрана многократно.

Операция *скрещивания* начинается с формирования пар хромосом, подлежащих скрещиванию. Вначале каждую хромосому поколения отбирают для дальнейшего скрещивания с фиксированной вероятностью p_c . Отобранные хромосомы группируют по парам. На основе каждой пары порождаются две новые хромосомы.

Обозначим некоторую отобранную пару хромосом $x = (x(1), \dots, x(n))$ и $x^* = (x^*(1), \dots, x^*(n))$. Операция *скрещивания* начинается с выработки целочисленного случайного числа R , принимающего значения $1, \dots, n - 1$ с равными вероятностями. Каждая из двух хромосом разбивается в точке R на две части:

$$\underline{x} = (x(1), \dots, x(R), x(R+1), \dots, x(n)) \text{ и } \underline{x}^* = (x^*(1), \dots, x^*(R), \\ x^*(R+1), \dots, x^*(n)).$$

Из них составляются две новые хромосомы путём объединения первой части одной хромосомы и правой части – другой:

$$\underline{x}' = (x(1), \dots, x(R), x^*(R+1), \dots, x^*(n)) \text{ и } \underline{x}'^* = (x^*(1), \dots, x^*(R), x(R+1), \dots, x(n)).$$

Каждая из полученных новых хромосом включается в новое поколение, заменяя участвующую в её образовании старую хромосому, только в том случае, если её значение функции цели $f(x)$ лучше. Кроме того может проверяться выполнение имеющихся ограничений на хромосомы поколения.

Операция *мутации* также начинается с отбора хромосом. Каждая из хромосом отбирается с вероятностью p_m . Для каждой отобранной хромосомы вырабатывается случайное число R , принимающего значения $1, \dots, n$ с равными

вероятностями. Затем значение R -й компоненты хромосомы заменяется на противоположное значение (1 на 0 или 0 на 1). Как и для операции скрещивания, полученная модификация включается в новую популяцию только при условии улучшения функции цели и выполнения имеющихся ограничений.

В рассматриваемом нами случае хромосомами являются перестановки $J = (j(1), \dots, j(n))$, а функция цели имеет вид

$$f(x) = \sum_{k=1}^n c_{j(k)} x_{j(k)}$$

которую надо минимизировать по множеству перестановок (решений) $J = (j(1), \dots, j(n))$ при имеющихся ограничениях (2.4).

Для нашего случая описанный выше классический генетический метод неприменим, поскольку имеем дело с перестановками, а не с булевыми векторами. Поэтому внесём следующие изменения в операции скрещивания и мутации.

Операция скрещивания. Обозначим отобранные перестановки (хромосомы) $J = (j(1), \dots, j(n))$ и $J^* = (j^*(1), \dots, j^*(n))$. Вырабатывается целочисленное случайное число R , принимающее равные вероятности на множестве $\{d, \dots, n - d\}$, где d есть целое число, $1 < d \leq n/2$. Каждая из имеющихся перестановок разбивается в точке R на две части:

$$J = (j(1), \dots, j(R), j(R+1), \dots, j(n)) \text{ и } J^* = (j^*(1), \dots, j^*(R), j^*(R+1), \dots, j^*(n)).$$

Сопоставим первые части этих двух перестановок $(j(1), \dots, j(R))$ и $(j^*(1), \dots, j^*(R))$. Если эти части имеют одинаковые элементы, которые занимают разные места в первой и второй частях, то переставим их. Формально, если $j(w) = j^*(w^*)$ и $w < w^*$, то вместо $(j(1), \dots, j(R))$ имеем

$$(j(1), \dots, j(w-1), j(w+1), \dots, j(w^*-1), j(w), j(w^*+1), \dots, j(R)), \quad (2.13)$$

а вместо $(j^*(1), \dots, j^*(R))$ имеем

$$(j^*(1), \dots, j^*(w-1), j^*(w^*), j^*(w+1), \dots, j^*(w^*-1), j^*(w^*+1), \dots, j^*(R)). \quad (2.14)$$

Если $w > w^*$, то в приведенных выражениях следует заменить j и w на j^* и w^* , соответственно, и наоборот.

Проведём такие модификации для всех одинаковых элементов в первых частях $(j(1), \dots, j(R))$ и $(j^*(1), \dots, j^*(R))$ перестановок $J = (j(1), \dots, j(R), j(R+1), \dots, j(n))$ и $J^* = (j^*(1), \dots, j^*(R), j^*(R+1), \dots, j^*(n))$. Обозначим модифицированные первые части $(\underline{j}(1), \dots, \underline{j}(R))$ и $(\underline{j}^*(1), \dots, \underline{j}^*(R))$. Объединяя их со своими вторыми частями, получаем 2 новых n -перестановки

$$\underline{J} = (\underline{j}(1), \dots, \underline{j}(R), j(R+1), \dots, j(n)) \text{ и } \underline{J}^* = (\underline{j}^*(1), \dots, \underline{j}^*(R), j^*(R+1), \dots, j^*(n)).$$

Аналогичную процедуру проводим со вторыми частями $(j(R+1), \dots, j(n))$ и $(j^*(R+1), \dots, j^*(n))$. В результате получаем ещё две новые n -перестановки.

Эти 4 новых n -перестановки, полученные в результате операции скрещивания двух имеющихся перестановок, включаются в дальнейшие операции генетического алгоритма.

Проиллюстрируем описанную процедуру на *примере*.

Пусть $n = 9$ и в операции скрещивания участвуют такие перестановки: $J = (3, 5, 9, 4, 2, 1, 6, 8, 7)$ и $J^* = (7, 1, 5, 9, 8, 3, 2, 6, 4)$. Пусть $R = 5$. Тогда $(j(1), \dots, j(R)) = (3, 5, 9, 4, 2)$, $(j^*(1), \dots, j^*(R)) = (7, 1, 5, 9, 8)$. Общими являются элементы 5 и 9. В первой перестановке элемент 5 занимает второе место, а во второй - третье, следовательно, $w = 2$, $w^* = 3$, $w < w^*$. Меняя места для элемента 5, в соответствии с (2.13) и (2.14) получаем перестановки $(3, 9, 5, 4, 2)$ и $(7, 5, 1, 9, 8)$. Для элемента 9 имеем $w = 2$, $w^* = 4$, $w < w^*$, и новые перестановки $(3, 5, 4, 9, 2)$ и $(7, 9, 5, 1, 8)$. Проведём аналогичную процедуру со вторыми частями перестановок $(1, 6, 8, 7)$ и $(3, 2, 6, 4)$. Здесь общим элементом является 6. Теперь формулы (2.13) и (2.14) дают две новые перестановки $(1, 8, 6, 7)$ и $(3, 6, 2, 4)$.

Объединяя новые части со своими старыми противоположными частями, получаем 4 новых 9-перестановки (3, 5, 4, 9, 2, 1, 6, 8, 7), (7, 9, 5, 1, 8, 3, 2, 6, 4), (3, 5, 9, 4, 2, 1, 8, 6, 7) (7, 1, 5, 9, 8, 3, 6, 2, 4). #

Операция мутации. Пусть перестановка $J = (j(1), \dots, j(n))$ выбрана для операции мутации. Вместо одного случайного числа R вырабатываются два разных случайных числа R и R^* , из множества $\{1, 2, \dots, n\}$. Далее осуществляется перестановка R -го и R^* -го элементов, в результате чего вместо перестановки $J = (j(1), \dots, j(R), j(R+1), \dots, j(R^*), j(R^*+1), \dots, j(n))$ получается новая перестановка $J = (j(1), \dots, j(R^*), (R+1), \dots, j(R), j(R^*+1), \dots, j(n))$.

Остальные элементы генетического алгоритма остаются прежними.

Метод последовательного поиска с горизонтом просмотра – это перебор для меньшего числа элементов, которые будем называть *базисными*, в отличие от перебора всех перестановок элементов вектора $(1, \dots, n)$, который практически невозможен. Идея этого метода высказана А.М. Андроном на одной из международных конференций и адаптирована диссертантом для решения поставленной задачи целочисленного программирования.

В этом методе последовательно фиксируются элементы с известными местами в конечной перестановке. Вначале таким местом является первое, потом второе и т.д. Первоначально (на нулевом шаге) отбирается h элементов, объявляемых *базисными*. Величина h называется *горизонтом просмотра*, $1 < h \ll n$ [29, 31]. Формируется множество всех $h!$ перестановок из отобранных (базисных) элементов. Устанавливается значение *рекорда* – некоторое возможное значение функции цели. Затем организуется два цикла по следующей схеме:

- *внешний цикл* по $h!$ перестановкам;
- *внутренний цикл* по неотобраным элементам.

Просматриваются все $(h + 1)!$ перестановки из очередного неотобранного элемента и базисных элементов. Для каждой перестановки проверяется её допустимость (соответствие всем имеющимся ограничениям) и вычисляется значение функции цели. Если перестановка допустима и её значение функции

цели лучше *рекорда*, то она запоминается, а рекорд обновляется. Запоминаются также все $(h + 1)!$ перестановки, полученные с участием данного небазисного элемента.

После окончания внешнего цикла первый элемент рекордной перестановки объявляется *финальным* (входящим в заключительную перестановку).

Далее описанная процедура повторяется. При этом в общем случае имеется k финальных элементов, значение *рекорда* и $(h + 1)!$ соответствующих перестановок. Объявляем первый элемент в перестановке, дающей рекорд, - *финальным*, а новый элемент *базисным*, если он таковым не был. Выбрасывая его из всех $(h + 1)!$ перестановок, получаем исходное множество перестановок *базисных элементов*. С ним и начинается описанная выше процедура отбора двух новых элементов – базисного и окончательного.

Вся процедура завершается, когда число базисных и окончательных элементов станет равным n . Искомая оптимальная перестановка $J = (j(1), \dots, j(n))$ получается приписыванием к окончательным элементам справа той перестановки базисных элементов, которая даёт значение рекорда.

Отметим, что *применение* всех выше рассмотренных *методов даёт только субоптимальные решения*. При этом метод ветвей и границ не исключает вероятности полного перебора вариантов. Сопоставление этих методов по эффективности подразумевает сравнительное решение достаточно большого количества примеров и не входил в задачи исследований. Однако, для размерности рассматриваемых задач при примерно одинаковом значении критерия, расчётанного на нескольких примерах, метод последовательного поиска с горизонтом просмотра дал примерно в 1.5 раза меньшее число перебираемых вариантов, поэтому он принят в качестве основного метода решения сформулированных задач целочисленного программирования.

Подсчитаем число всех перестановок, рассматриваемых в описанной процедуре последовательного поиска. Во-первых, необходимо вычислить $h!$ начальных h -перестановок, для чего для чего воспользуемся ранее описанным оператором $Permut(n)$.

Вычисление $h!$ начальных h -перестановок.

Если имеется k окончательных элементов, то число неотобранных элементов равно $n - k - h$. Для каждого из них формируется $(h + 1)!$ перестановок, т.е. всего $(n - k - h)(h + 1)!$. Следовательно, общее число рассматриваемых перестановок равно

$$d(n, h) = h! + \sum_{k=0}^{n-h-1} (n - k - h)(h + 1)! = h! + (h + 1)! \sum_{i=n-h}^0 i = h! + (h + 1)! \frac{1}{2} (n - h)(n - h + 1). \quad (2.15)$$

Это значительно меньше, чем полный перебор всех n -перестановок. Для $n = 20$, например, $20! = 2.433 \times 10^{18}$, в то время как формула (2.15) даёт значения, приведенные в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значения числа перестановок $d(20, h)$

$h = 2$	$h = 3$	$h = 4$	$h = 5$	$h = 6$	$h = 7$
1.028×10^3	3.678×10^3	1.634×10^4	8.652×10^4	5.229×10^5	3.674×10^6

2.7. Постановка и решение задачи ресурсно-временной оптимизации графиков работы бригад по обслуживанию воздушных судов при заданной очередности отправок в сбойной ситуации аэропорта

После того, как определена очерёдность подготовки ВС к отправлению, необходимо для каждого вида обслуживания (ресурса в прежней терминологии) составить график работы соответствующих бригад (или средств механизации). Это означает, что для каждой бригады следует определить последовательность обслуживаемых ВС и для каждого из ВС указать начало и окончание обслуживания. При этом основным здесь является территориальное расположение ВС, обслуживаемых один за другим. Критерием оптимальности является *минимальная сумма расстояний*, покрываемых всеми имеющимися бригадами при перемещениях между ВС.

Математическая постановка задачи. Рассматривается конкретный вид обслуживания. Известна очерёдность обслуживания ВС, задаваемая в виде n -

перестановки $J=(j(1), \dots, j(n))$. Для каждого ВС известен период времени, в течение которого проводится его обслуживание. Для k -го по порядку ВС это будет интервал $(\underline{t}_{j(k)}, t_{j(k)})$. Кроме того известно местонахождение каждого ВС, число мест которых равно L . Для k -го по порядку ВС его местонахождение обозначим $V(j(k))$. Для нас важно знать только время, необходимое для перемещения бригады между этими местами. Зададим его квадратной матрицей D порядка $L \times L$, так что $D_{\eta, \eta'}$ есть время перемещения между местами η и η' .

Сформулируем задачу распределения работ по бригадам. Обозначим G число соответствующее бригад (средств механизации, отдельных исполнителей и пр.). Для w -ой бригады, $w = 1, \dots, G$, известно время начала $\underline{\tau}_w$ и окончания τ_w работы. Тогда число бригад $g(t)$, работающих в момент времени t , определяется по формуле, аналогичной формуле (2.1):

$$g(t) = \sum_{w=1}^G \delta(t - \underline{\tau}_w) \delta(\tau_w - t). \quad (2.16)$$

Для w -ой бригады последовательность номеров обслуживаемых ВС из перестановки $J = (j(1), \dots, j(n))$ задаётся вектором $j^{(w)} = (j_{1,w}, \dots, j_{|w|,w})$, где $|w|$ - число обслуживаемых ВС для бригады w .

Теперь задача формулируется так.

Найти целочисленные вектора $j^{(1)}, \dots, j^{(G)}$, которые минимизируют функции цели

$$f(j^{(1)}, \dots, j^{(G)}) = \sum_{w=1}^G \sum_{\zeta=1}^{|w|-1} D_{V(j_{\zeta,w}), V(j_{\zeta+1,w})} \quad (2.17)$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned}
\bigcup_w j^{(w)} &= \{1, \dots, n\}, \\
j^{(w)} \cap j^{(w')} &= \emptyset, \quad w \neq w', \\
\underline{\tau}_w &\leq \underline{t}_{j_1, w}, \quad t_{j_{|w|}, w} \leq \tau_w, \quad \forall w, \\
t_{j_{\zeta}, w} + D_{V(j_{\zeta}, w), V(j_{\zeta+1}, w)} &< \underline{t}_{j_{\zeta+1}, w}, \quad \zeta = 1, \dots, |w|, \quad w = 1, \dots, G.
\end{aligned} \tag{2.18}$$

Прокомментируем вышеприведенные формулы. Первые два равенства формулы (2.17) фиксируют, что каждое ВС должно быть обслужено одной бригадой. В этих равенствах \cup означает сумму, а \cap - произведение элементов векторов. Третья строка формулы описывает требование проведения обслуживания в период времени работы соответствующей бригады. Последняя строка оговаривает, что время начала обслуживания следующего ВС не должно быть раньше времени окончания обслуживания предыдущего ВС плюс время на перемещения бригады к новому месту обслуживания.

Сформулированная модель в постановке 2.17, 2.18:

- является инвариантной к критериям эффективности очередности подготовки ВС к отправлению, в качестве которых могут быть использованы временные финансовые и другие показатели;
- учитывает местоположение ВС на перроне аэропорта, что позволяет минимизировать сумму расстояний, покрываемых всеми имеющимися бригадами по наземному обслуживанию при перемещениях между обслуживаемыми ВС;
- учитывает динамику состояния ресурсов (бригад, средств механизации, место стоянок самолётов и пр.), изменяющихся во времени суток.

Для решения сформулированной задачи используем описанный ранее метод последовательного поиска с горизонтом просмотра [29, 31]. С этой целью вместо G перестановок $j^{(1)}, \dots, j^{(G)}$ будем рассматривать одну n -перестановку $J = (j(1), \dots, j(n))$ из множества чисел $\{1, \dots, n\}$. Значение $j(v)$ трактуется так: если взять его по модулю G (т.е. остаток от деления $j(v)$ на G) и прибавить единицу, то это будет номер бригады, которая обслуживает ВС, стоящее в списке под

номером v : $w = \text{mod}_G j(v)$. Например, если $G = 4$, то $j(2) = 13$, то это означает, что второе ВС из списка всех ВС обслуживает вторая бригада (поскольку модуль 13 по 4 есть 1).

Следовательно, для конкретно вида обслуживания следует найти перестановку $J = (j(1), \dots, j(n))$, минимизирующую критерий (2.17). При этом прежние неизвестные определяются через новые по формуле

$$j^{(w)} = (j(v) + 1 : \text{mod}_G j(v) = w) \quad (2.19)$$

Как и ранее, в каждый момент времени все ВС из списка делятся на три группы. Первую группу оставляют ВС, для которых номера обслуживаемых бригад уже определены. Номера таких ВС назовем *фиксированными номерами*. Вторую группу составляют ВС, номера которых находятся в *горизонте просмотра*. Назовем их *базисными номерами*. Остальные номера назовем *непросмотренными*.

Напомним, что число базисных номеров всегда равно h (*горизонт просмотра* $1 < h \ll n$). Число фиксированных номеров постоянно увеличивается на единицу, пока не достигнет значения $n - h$.

Теперь можно применять алгоритм, описанный в разделе 2.6.

Наряду с вышеизложенным, можно применять и другой, более простой подход. Именно он оказывается более целесообразным на первом этапе внедрения предлагаемого в данной работе подхода. Он заключается в простой циклической очередности назначения бригад на обслуживание ВС. После того как такой циклический график работы бригад составлен, дальнейшая минимизация покрываемых расстояний осуществляется путём «цепочек» обмена ВС между бригадами. Этот подход и будет реализован в дальнейшем при алгоритмизации подготовки ВС к отправлениям.

Разработанные в настоящей главе оптимизационные модели реализованы в качестве типовых проектных решений (модулей) «СПП-ССО» и «УР-ССО» в составе соответствующих подсистем АС «КОБРА-2».

Выводы по главе 2

1. Разработанный и реализованный в модуле «СПП-ССЭ» АС «КОБРА-2» эвристический метод, обеспечивающий реализацию операций по ОУ самолетовылетами в ССА, существенно сокращает время принятия решений в ССА, но не дает оптимальных результатов.

2. Разработанные аналитические модели оптимизации очередности отправления воздушных судов и графиков работы бригад по обслуживанию при оперативном управлении в ССА отличаются оригинальностью и более полным учётом различных факторов по сравнению с ранее предлагаемыми моделями и методами. Эти отличия заключаются в следующем:

2.1. Впервые задача оптимизации очередности отправления ВС и графиков работы бригад по обслуживанию ВС при выходе из ССА сформулирована математически строго, как задача теории расписания.

2.2. На основе анализа различных методов теории расписаний для решения рассматриваемой двухуровневой задачи адаптирован наиболее подходящий для этого случая метод последовательного поиска с горизонтом просмотра.

2.3. Модель является инвариантной к критериям эффективности очередности подготовки ВС к отправлениям, в качестве которых могут быть использованы как временные показатели, финансовые затраты и пр.

2.4. В модели учтено местоположение ВС на перроне аэропорта, что позволяет минимизировать сумму расстояний, покрываемых всеми имеющимися бригадами по наземному обслуживанию при перемещениях между ВС.

2.5. В модели учтена динамика наличия располагаемых ресурсов и их состояния (бригад, средств механизации, мест стоянок ВС на пероне и пр.), изменяющегося во времени суток.

3. Разработанные в настоящей главе оптимизационные модели реализованы в качестве типовых проектных решений АС«КОБРА-2» и внедрены в аэропортах Абакан и Сургут в составе модулей «СПП-ССО» и «УР-ССО» соответствующих подсистем «СПП» и «УР».

Глава 3. АВТОМАТИЗАЦИЯ РЕСУРСНО-ВРЕМЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОЧЕРЕДНОСТЬЮ ОТПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ И ГРАФИКОВ РАБОТОЙ БРИГАД В СБОЙНОЙ СИТУАЦИИ АЭРОПОРТА

3.1. Вычислительная среда для разработки модулей автоматизации ресурсно-временной оптимизации

В настоящей главе предлагаются решения по автоматизации оптимизационных расчетов на базе аналитических моделей главы 2. Разработанный инструментарий является функциональным и информационным обеспечением соответствующих *модулей автоматизации ресурсно-временной оптимизации*, реализуемых в составе соответствующих подсистем АС «КОБРА-2»:

- модуль оптимизации очередности отправления ВС в ССА – «СПП-ССО»;
- модуль оптимизации графиков работы бригад в ССА – «УР-ССО».

В качестве вычислительной среды для разработки автоматизированных модулей ресурсно-временной оптимизации с использованием разработанных аналитических моделей и имитационной модели (далее – глава 4) диссертантом *использован продукт Mathcad* компании РТС – мирового лидера разработки систем автоматизированного проектирования и других систем [46, 77]. Mathcad – универсальная система, используемая для применения математических методов. Вычислительная среда Mathcad обеспечивает расчеты в любой научно-технической области в близком к стандартному математическому языку виде по сложным математическим формулам, включая:

- численные методы и аналитические преобразования;
- обширный набор встроенных математических функций;
- формульный и текстовый редактор, вычислитель, средства графики;

- обширную базу математической и инженерной справочной информации.

Перечисленный набор возможностей вычислительной среды Mathcad по созданию поименованных массивов информации и функциональных операторов упрощает постановку и решение поставленных задач путем:

- организации информационной базы;
- автоматизации обработки исходной информации, расчета критериев эффективности, оптимальной очередности отправления ВС, процедуры составления графиков работы бригад и валидации методов на модельных примерах.

Листинги операторов (программ), автоматизирующих оптимизационные расчеты с применением разработанных аналитических моделей, в диссертационной работе не приводятся, так как они составляют коммерческую тайну. Приводится только технология автоматизированных оптимизационных расчетов.

3.2. Организация информационного обеспечения и расчетов исходных данных в модулях автоматизации ресурсно-временной оптимизации

Организация структуры данных для модулей автоматизации оптимизационных расчетов заключается в формировании исходных массивов информации:

- о ВС;
- о располагаемых ресурсах;
- об используемых ресурсах;
- о матрице расстояний между возможными местами нахождения бригад по обслуживанию ВС.

Производными массивами являются графики располагаемых ресурсов и состояния ресурсов.

Общая информация о ВС оформляется в виде массива (файла) *Air*. Он представляет собой $4 \times n$ матрицу, в которой столбцы соответствуют воздушным

судам. Первый элемент столбца содержит код, идентифицирующий данное ВС. Второй – тип ВС. Третий – число пассажиров рейса, выполняемого данным ВС. Четвёртый элемент – весовой показатель, относящийся на единицу времени задержки ВС (потери c_j при задержке отправления j -го ВС).

Пример массива представлен в таблице 3.1 для $n = 15$ ВС. В частности, для 10-го ВС тип $Air_2 = 3$, число пассажиров $Air_3 = 120$, величина потерь $Air_4 = 1$.

Таблица 3.1 – Массив Air

Air	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Air_2	1	3	4	2	1	5	5	4	2	3	3	4	2	5	3
Air_3	20	100	230	88	51	204	210	112	98	120	98	134	96	211	89
Air_4	3	1	2	1	1	1	1	3	1	1	1	2	3	1	1

Информация о располагаемых ресурсах содержится в массивах (файлах) $R1$ и $R2$. Массивы представляют собой матрицы, в которых строки соответствуют различным ресурсам. Число строк равно m , т.е. числу видов ресурсов аэропорта, обеспечивающих вылеты рейсов. Строка содержит несколько записей, каждая – для своего интервала времени суток, в течение которого величина ресурса остаётся неизменной.

Одна запись массива $R1$ включает:

- начало θ -го временного интервала \underline{t}_θ ;
- окончание θ -го временного интервала \underline{t}_θ .

Максимальное число записей 5. После последней записи строки ставится -1. В массиве $R2$ столько записей, сколько записей в соответствующей строке массива $R1$. В записи указан объём имеющегося ресурса в соответствующем интервале.

На основании первых трёх показателей рассчитывается функция $g_i(t)$, указывающая объём i -го располагаемого ресурса в момент времени t .

Примеры массивов представлены в таблице 3.2 и таблице 3.3 для $m = 6$ видов ресурса и 5 записей. В частности, для ресурса 1 интервал $(\underline{\theta}_1, \theta_1) = (0, 5)$ есть первый интервал, в котором объём ресурса постоянен и равен $R2_{1,1} = 2$.

Таблица 3.2 – Массив R1

i	$\underline{\theta}_1$	θ_1	$\underline{\theta}_2$	θ_2	$\underline{\theta}_3$	θ_3	$\underline{\theta}_4$	θ_4	$\underline{\theta}_5$	θ_5	
1	0	5	5	13	13	16	16	20	20	24	-1
2	0	6	6	14	14	17	17	21	21	24	-1
3	0	8	8	16	16	20	20	24	-1	0	0

Таблица 3.3 – Массив R2

i	$(\underline{\theta}_1, \theta_1)$	$(\underline{\theta}_2, \theta_2)$	$(\underline{\theta}_3, \theta_3)$	$(\underline{\theta}_4, \theta_4)$	$(\underline{\theta}_5, \theta_5)$
1	2	3	3	2	3
2	2	3	3	2	2
3	3	3	4	3	0
4	2	3	3	3	3
5	4	3	4	2	2
6	2	3	3	2	4

Информация об используемых ресурсах (об обслуживании) содержится в массиве (файле) Se . Он представляет собой матрицу, в которой строки соответствуют различным ресурсам. Строка содержит несколько записей, каждая – для одного типа ВС. Запись содержит три числа. Первые два числа – это начало $\underline{t}_{j,i}$ и окончание $t_{j,i}$ интервала времени после начала обслуживания ВС, в течение которого величина потребляемого ресурса остаётся неизменной. Третье число равно величине потребляемого ресурса в этом интервале $h_{j,i} > 0$. Число записей равно числу T типов ВС.

На основании этих показателей рассчитывается функция $h_{j,i}(t)$, указывающая объём потребляемого ресурса i в момент времени t после начала обслуживания ВС j , имеющего соответствующий тип.

Пример массива Se представлен в таблице 3.4 для $m = 6$ видов ресурса и 5 типов ВС. В частности, для первого типа ВС в интервале $(\underline{t}_{1,1}, t_{1,1}) = (3, 4)$ объём потребляемого ресурса первого вида постоянен и равен $h_{1,1} = 1$. При составлении графиков работы бригад используется матрица расстояний между возможными местами нахождения бригад. Она обозначается D и имеет порядок $L \times L$, так что $D_{\eta, \eta'}$ есть время перемещения между местами η и η' .

Таблица 3.4 – Массив *Se*

<i>i</i>	$\underline{t}_{1,i}$	$t_{1,i}$	$h_{1,1}$	$\underline{t}_{2,i}$	$t_{2,i}$	$h_{2,1}$	$\underline{t}_{3,i}$	$t_{3,i}$	$h_{3,1}$	$\underline{t}_{4,i}$	$t_{t,i}$	$h_{4,1}$	$\underline{t}_{5,i}$	$t_{5,i}$	$h_{5,1}$
1	3	4	1	4	5	1	4	6	1	3	5	1	4	6	1
2	3	4	2	3	5	1	3	4	1	3	5	2	6	7	2
3	2	4	1	3	4	2	3	4	2	4	6	1	3	5	2
4	2	3	1	2	3	2	2	4	2	3	4	1	3	7	2
5	3	4	2	3	4	1	3	5	2	3	6	2	5	6	2
6	4	5	1	4	6	1	4	6	1	5	7	1	5	7	1

Отметим, что все описанные массивы считаются заданными. Они предварительно формируются на основании имеющейся у главного оператора информации о РДС и СПП, видах ВС и ресурсов для их наземного обслуживания, технологий и графиков обслуживания, и т.п.

Основными производными массивами являются *График располагаемых ресурсов gg* и *График состояния ресурсов graphic*. Массив *gg* представляет собой матрицу, в которой *m* строк соответствуют ресурсам. Столбцы соответствуют равноотстоящим моментам времени суток, для которых проводятся расчёты. *t*-ый столбец соответствует *t*-му моменту суток. Начальный момент – начало суток ($t = 1$), последний момент – конец суток. Если шаг между рассматриваемыми моментами равен 10 минутам, то последний момент $t = 24 \times 60 \cdot 10 - 1 = 143$. В этом случае размерность матрицы *gg* есть $m \times 143$. Клетки матрицы содержат располагаемую величину данного ресурса в данный момент времени суток. Этот массив формируется программно на основании массивов *R1* и *R2*. К началу суток массив должен быть сформирован.

Пример массива представлен в таблице 3.5 для $m = 6$ видов ресурса и моментов времени суток $t = 1, \dots, 143$. В частности, в момент времени $t = 1$ второй ресурс имеется в объёме 2.

Структура матрицы graphic аналогична структуре матрицы *gg*, однако число строк в нём в два раза больше (см. на примере таблицы 3.6 раздела 3.3). Верхняя половина этой матрицы (до строки *m* включительно) содержит ту же информацию, что и матрица *gg*, однако клетки содержат остающуюся величину

ресурса на данный момент времени (первоначально располагаемый ресурс минус используемый в данный момент). Нижняя половина этой матрицы (от строки $m+1$ и ниже) содержит информацию о номерах ВС, для которых используется данный ресурс в данный момент времени.

Таблица 3.5 – Массив *gg*

<i>i/t</i>	1	2	3	4	...	28	29	30	31	...	140	141	142	143
1	2	2	2	2	...	2	2	3	3	...	2	2	2	2
2	2	2	2	2	...	2	2	2	2	...	2	2	2	2
3	3	3	3	3	...	3	3	3	3	...	0	0	0	0
4	2	2	2	2	...	2	2	3	3	...	3	3	3	3
5	4	4	4	4	..	4	4	4	4	...	2	2	2	2
6	2	2	2	2	...	2	2	3	3	...	4	4	4	4

Массив *graphic* формируется оператором *Introd(queue)* на основании заданной список (вектором) *queue* очередности обслуживания ВС.

Приведенные массивы информации будут в дальнейшем использованы использованы при описании алгоритмов и программ вычислений.

Автоматизация обработки исходной информации в модулях «СПП-ССО» и «УР-ССО» осуществляется путем реализации соответствующих ниже описываемых программ (операторов).

Оператор *gg* составляет одноимённый массив *График располагаемых ресурсов gg* на основании информации массивов *R1* и *R2*. Оператор *ggF* дополняет массив *gg* пустыми строками, подготавливая его для работы последующих операторов *gt*, *gtAll* и *Introd*. Дополненный массив обозначается в разных контекстах *GG* или *graphic*.

Оператор *gt(GG, j, i, τ)* определяет начало обслуживания ВС *j* в части ресурса *i*, на основании текущей информации *GG*. Здесь τ – самый ранний срок начала обслуживания. Одновременно он записывает информацию об использовании ресурса *i* для ВС *j*. Если в некоторый момент времени этот ресурс уже используется другими ВС, то уже имеющаяся последовательность номеров этих ВС умножается на 100, к произведению прибавляется *j* и такой код записывается в соответствующую ячейку массива. В последующем расшифровка кода осуществляется оператором *Filter*.

Оператор $gtAll(GG, j, \tau)$ применяет предыдущий оператор для всех видов ресурса i .

Оператор $Introd(queue, \tau)$ составляет *График состояния ресурсов* $graphic$ при обслуживании ВС из списка $queue$.

Автоматизация расчета критериев эффективности для модулей оптимизационных расчетов «СПП-ССО» и «УР-ССО» осуществляется с применением ниже описанных операторов.

Оператор $LastTime(graphic, T_{max})$ вычисляет значение первого критерия – момент времени окончания обслуживания последнего ВС, используя массив $graphic$. Просмотр массива начинается с удалённого момента времени и перемещается к началу массива, пока не встретятся ненулевые записи, свидетельствующие о наличии ВС или ВС на обслуживании.

Оператор $setOffj(set, j)$ вставляет в список set номер ВС номер ВС j , если его там нет. Если $j = 0$, то ничего не меняется.

Оператор $Filter(\xi)$ проводит расшифровку кода ξ , выдавая список номеров ВС.

Оператор $ServAir(graphic, t)$ выдаёт список номеров ВС, обслуживаемых в момент времени t согласно массиву $graphic$.

Оператор $EndServAir(graphic, T_{maxend})$ выдаёт список моментов времени окончания обслуживания ВС согласно массиву $graphic$.

Оператор $Criteria(graphic, \lambda, \tau)$ вычисляет значение заданного критерия $\lambda = 1, 2, 3$ на основании массива $graphic$.

3.3. Автоматизация расчета оптимальной очередности отправления воздушных судов на базе модуля «СП-ССО»

Основным здесь является оператор $SeqAlg(AllAirc, h, T, \tau, \lambda)$, реализующий алгоритм *последовательного поиска с горизонтом просмотра* (раздел 2.5). В качестве исходных данных он использует список рассматриваемых номеров ВС $AllAirc$, горизонт просмотра h , начальную τ и конечную T границу временного интервала графика $graphic$, номер используемого критерия эффективности λ . Основополагающим массивом при работе оператора является массив $graphic$, который постоянно пополняется новыми записями.

Оператор работает с двумя массивами: $SubFix$ и $SubIn$.

Первый массив содержит номера ВС, место которых в окончательном списке уже определено – это сейчас занимаемое место в этом списке.

Второй массив содержит h номеров ВС (по размеру горизонта), находящихся в списке просматриваемых ВС в пределах горизонта.

Первоначально массив $SubFix$ объявляется пустым, это осуществляется путём задания его двумерным вектором из нулей. Массив $SubIn$ формируется h первыми ВС из исходного списка ВС $AllAirc$. Оператор содержит основную рекуррентную процедуру, на каждой итерации которой список $SubFix$ добавляется новым ВС из списка $SubIn$. При этом в список $SubIn$ вводится новое ВС из числа ещё не просмотренных ВС (не бывавших в списках $SubFix$ и $SubIn$). Оператор оканчивает свою работу, когда в списках $SubFix$ и $SubIn$ окажутся все ВС из исходного списка $AllAirc$ окончательный список состоит из списка $SubFix$ и следующего за ним списка $SubIn$.

Опишем работу оператора в течение *одной итерации*. Вначале формируется общий список $Kora$, включающий списки $SubFix$ и $SubIn$. Затем организуется цикл, в течение которого просматриваются ВС из списка $AllAirc$, не входящие в список $Kora$. Пусть j есть номер очередного просматриваемого ВС. Формируются все $(h + 1)!$ перестановки, в которых первыми являются элементы из списка $SubFix$, за которыми следует очередная перестановка из j и

всех элементов списка *SubIn*. Для каждой такой перестановки рассчитывается принятый критерий эффективности. Если он оказывается лучше ранее достигнутых значений, то он объявляется *рекордом* и запоминается вместе с самой *рекордной перестановкой*.

После окончания очередной итерации в конец списка *SubFix* вводится первый элемент *рекордной перестановки*, отсутствующий в списке *SubFix*. Следующие за ним *h* элементов *рекордной перестановки* образуют список *SubIn*.

Как уже отмечалось, результатом является список *Kora*, содержащий последние версии списков *SubFix* и *SubIn*. К концу этого списка приписывается дополнительный элемент, содержащий значение критерия эффективности.

3.4. Автоматизация ресурсно-временной оптимизации графиков работы бригад на базе модуля «УР-ССО»

Как и раньше, *общая информация о ВС* содержится в массиве (файле) *Air* (см. таблицу 3.1). Теми же самыми остаются массивы (файлы) *R1* и *R2*, содержащие *информацию о располагаемых ресурсах* (см. таблицы 3.2 и 3.3). Таким же остаётся массив *Se* с *информацией об используемых ресурсах (об обслуживании)*, см. таблицу 3.4. Рассчитываемая на основании этой информации функция $h_{j,i}(t)$ указывает необходимое число бригад (отдельных исполнителей, средств механизации) в момент времени *t* после начала обслуживания BC_j , имеющего соответствующий тип.

Заданным также является массив *graphic*, получаемый в результате работы оператора $SeqAlg(AllAirc, h, T, \tau, \lambda)$, задающего для всех ВС график обслуживания всех видов.

Как уже отмечалось выше, при составлении графиков работы бригад используется *матрица расстояний* между возможными местонахождениями бригад. Она обозначается *D* и имеет порядок $L \times L$, так что $D_{\eta, \eta'}$ есть время перемещения между местами η и η' .

Остальные «производные» массивы относятся к каждому конкретному виду обслуживания (ресурса), но при этом структура их остаётся прежней. В массивах *График располагаемых ресурсов* gg (см. таблицу 3.5) и *График состояния ресурсов* $graphic$ (см. приведенную в разделе 3.5 таблицу 3.6) теперь строки соответствуют имеющимся бригадам, так что вместо m и $2m$ строк будет, соответственно, G и $2G$ строк. В связи с этим они теперь будут называться массивах *График работы бригад* $ggB(i)$ и *График состояния бригад* $graphicB(i)$. Номер указывает вид обслуживания. При этом, как и раньше, t -ый столбец соответствует t -му моменту суток. В этих таблицах ноль (0) означает, что в данный момент времени бригада не работает, а символ -1 означает, что она простаивает. Число, отличное от 0 и -1, указывает номер ВС, обслуживаемого бригадой в данный момент.

Опишем основные операторы, реализующий рассматриваемый метод составления графиков работы бригад.

Оператор $Dist0(L)$ формирует квадратную матрицу D порядка L из нулей.

Оператор $Dist(\eta, \eta', d)$ вводит в симметричную матрицу D расстояние d между местами η и η' . Для модельного примера эти расстояния генерировались датчиком случайных чисел. На этот случай указывает отрицательное значение величины d . Его абсолютное значение имеет равномерное распределение в интервале $(0, |d|)$.

Оператор $ggB(i)$ составляет одноимённый массив *График работы бригад* ggB , *оператор* $ggFB(i)$ дополняет массив ggB пустыми строками.

Оператор $gtB(GG, j, i, w, \tau)$ определяет период обслуживания i -го вида ВС j для w -ой бригады на основании текущей информации графика обслуживания ВС GG . Он выдаёт строку, элементами которой являются 0, -1 и номер ВС j . Длина строки равна числу рассматриваемых моментов времени, в нашем случае 143.

Оператор $gtAllB(GG, i, \tau)$ применяет предыдущий оператор для всех бригад данного вида и всех ВС. В результате он формирует массив *График состояния бригад* $graphicB(i)$.

Оператор $TabASB(GtbAll)$ выдаёт список номеров ВС, обслуживаемых каждой бригадой. Бригадам, проводящим данный вид обслуживания, соответствуют строки. На вход оператора поступает массив $GtbAll$, выдаваемый *Оператором* $gtAllB(GG, i, \tau)$.

Оператор $ListAir(GG, ggBt, i)$ для каждого ВС из графика GG выдаёт три значения: номер ВС, проходящего данный вид обслуживания i , начало и окончание обслуживания.

Оператор $CriteriaB(GtbAll)$ вычисляет расстояние, покрываемое каждой бригадой, проводящей данный вид обслуживания, а также сумму этих расстояний. Он выдаёт вектор таких расстояний. Последним элементом является указанная сумма.

Для реализации алгоритма *последовательного поиска с горизонтом просмотра*, предполагается использовать *Оператор* $SeqAlg(AllAirc, h, T, \tau, \lambda)$ – модификацию оператора $SeqAlg(AllAirc, h, T, \tau, \lambda)$, отличающегося от него заменой используемых массивов и операторов на нужные для этого случая.

3.5. Валидация ресурсно-временной оптимизации очередности подготовки воздушных судов к отправлению на модельном примере

В данном разделе будет проиллюстрирована корректность разработанных алгоритмов и программ для исходных данных, представленных в таблицах 3.1. – 3.5.

Иллюстрация работы алгоритма последовательного поиска с горизонтом просмотра (раздел 2.6). В таблице 3.6 приведен результат работы соответствующей программы $SecAlg(AirList, h, Tmax, \tau, \lambda)$ для следующих исходных данных. Массив рассматриваемых ВС $AiLi = (1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 7\ 8\ 9\ 10\ 11\ 12\ 13\ 14\ 15)^T$, их характеристики представлены в таблице 3.1. Горизонт просмотра

$h = 3$. Максимальное время окончания обслуживания последнего ВС $T_{max} = 50$.
Момент времени начала обслуживания ВС $\tau = 0$.

Рассмотрим вначале первый критерий эффективности ($\lambda = 1$). Была получена следующая очередность обслуживания ВС:

$$SecAlg(AiLi, 3, 50, 0, 1) = (4\ 2\ 3\ 1\ 5\ 12\ 6\ 9\ 13\ 11\ 10\ 15\ 7\ 14\ 8\ 39). \quad (3.1)$$

Последним элементом в этой последовательности является значение первого критерия эффективности, т.е. момент окончания обслуживания последнего ВС. Он равен 39.

Соответствующий *График состояния ресурсов graphic* представлен в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – *График состояния ресурсов graphic*

i/t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	2	2	2	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1
2	2	2	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	1	1	1	1	3	2	1	1	1	2	2
4	2	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2
5	4	4	3	3	2	2	0	2	2	0	2	2	2
6	2	2	2	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
7	0	0	0	4	4	2	203	203	3	1	1	5	5
8	0	0	4	4	402	2	3	3	3	1	1	5	5
9	0	0	4	4	2	2	0	3	301	301	105	5	0
10	0	4	4	2	2	2	3	3	1	1	5	5	5
11	0	0	4	4	2	2	203	3	3	301	1	5	5
12	0	0	0	4	4	402	2	2	3	3	301	1	5

Продолжение таблицы 3.6 – *График состояния ресурсов graphic*

i/t	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	1	0	0	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1
2	0	0	0	0	0	2	1	1	0	1	0	1	2
3	1	0	0	2	3	3	1	1	1	1	1	1	3
4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	2	2	0	0	4	4	3	3	3	3	3	2	2
6	1	1	0	0	0	2	2	1	1	0	2	1	2
7	12	1206	1206	6	0	0	0	9	9	13	13	11	11
8	12	12	12	6	6	0	9	9	913	13	1311	11	0
9	6	1206	1206	12	0	0	9	9	13	13	11	11	0
10	12	12	6	6	6	9	9	13	13	11	11	11	10
11	12	12	1206	1206	0	0	9	9	13	13	11	11	11
12	5	6	1206	1206	1206	0	0	9	9	913	11	1311	11

Продолжение таблицы 3.6 – Графика состояния ресурсов *graphic*

<i>i/t</i>	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
1	1						0	1	2	2	2	2	3
2	1	1	2	1	1	0	0	0	0	1	3	1	1
3	1	1	3	1	1	1	0	0	0	1	1	3	3
4	0	0	0	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1
5	2	2	2	2	2	0	2	0	0	3	1	1	3
6	2	2	2	2	2	2	1	1	1	0	2	2	2
7	11	10	10	10	15	1508	1507	708	7	14	14	14	0
8	10	10	0	15	15	8	8	8	7	7	0	0	14
9	10	10	0	15	15	7	708	708	1408	14	14	13	0
10	10	10	15	15	15	8	8	7	7	7	14	14	14
11	10	10	10	15	15	1508	8	708	708	0	14	14	0
12	11	10	10	15	15	15	1507	708	708	714	14	14	14

Прокомментируем представленные данные. Во-первых, напомним, что столбцы соответствуют моментам времени суток, равноотстоящим на 10 минут, т. е. на 1/6 часа. Во-вторых, первые 6 строк в каждой таблице содержат неиспользуемые объёмы шести видов ресурса, а последующие 6 строк – номера ВС, использующих ресурс с номером i – б. Например, в момент времени $t = 4$ было начато обслуживание ВС номер 2, при этом использовался четвёртый ресурс. Полное обслуживание этого ВС окончилось в момент времени $t = 8$. Последним было ВС с номером 14, его обслуживание началось в момент $t = 35$ закончилось в момент 39. Обслуживание 15-го ВС началось в момент $t = 29$ и закончилось в момент 33.

Итак, значение первого критерия равняется 39 (на это указывает номер последнего столбца таблицы). Сравним это с «естественной» очередностью обслуживания, при которой ВС обслуживаются в порядке их расположения в списке *Air* всех ВС. Оказывается, в этом случае значение критерия равно 44, что хуже на треть.

Поэкспериментируем теперь с разными значениями параметров алгоритма. Во-первых, в качестве горизонта возьмём значение $h = 2$. Алгоритм выдаёт следующий результат:

$$SecAlg(AiLi, 2, 50, 0, 1) = (2\ 3\ 5\ 4\ 9\ 13\ 7\ 8\ 12\ 14\ 10\ 11\ 15\ 1\ 6\ 42). \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

Значение критерия равно 42, что хуже ранее полученного значения 39. Однако, время счёта уменьшилось.

Для значения горизонта $h = 4$ ожидается, что значение критерия будет лучше, чем 39. Была получена такая очередность обслуживания ВС:

$$SecAlg(AiLi, 4, 50, 0, 1) = (1\ 5\ 4\ 9\ 13\ 2\ 12\ 10\ 11\ 3\ 7\ 15\ 8\ 14\ 6\ 39). \dots\dots\dots (3.3)$$

Значение критерия оказалось равным предыдущему, т.е. 39.

Наконец, рассмотрим значение горизонта $h = 5$.

В этом случае

$$SecAlg(AiLi, 5, 50, 0, 1) = (5\ 1\ 9\ 13\ 4\ 3\ 10\ 8\ 14\ 15\ 3\ 11\ 6\ 12\ 7\ 39). \dots\dots\dots (3.4)$$

Мы видим, что результат остался прежним, хотя очередность обслуживания изменилась. Это говорит о том, что оценка оптимального значения критерия, равная 39, является весьма надёжной.

Приведём соответствующие результаты в случае использования второго и третьего критериев: суммарных человеко-часов, проведенных пассажирами в аэропорту, и суммарных потерь за все задержки. Во-первых, отметим, что при «естественной» очередностью обслуживания, при которой ВС обслуживаются в порядке их расположения в списке *Air* всех ВС, значение критерия равно 4.438×10^4 для второго и 6.396×10^4 – для третьего критерия.

При горизонте, равном двум, для второго критерия имеем:

$$SecAlg(AiLi, 2, 50, 0, 2) = (2\ 4\ 15\ 13\ 9\ 11\ 8\ 10\ 12\ 6\ 7\ 14\ 3\ 5\ 1\ 4.603 \times 10^4), \dots\dots\dots (3.5)$$

а для третьего:

$$SecAlg(AiLi, 2, 50, 0, 3) = (2\ 1\ 4\ 9\ 11\ 10\ 5\ 7\ 14\ 12\ 6\ 8\ 3\ 13\ 15\ 7.615 \times 10^4). \dots\dots\dots (3.6)$$

При горизонте, равном трём, для второго критерия имеем:

$$SecAlg(AiLi, 3, 50, 0, 2) = (3\ 4\ 13\ 9\ 2\ 11\ 8\ 10\ 12\ 6\ 7\ 14\ 5\ 15\ 1\ 4.149 \times 10^4), \quad (3.7)$$

а для третьего:

$$SecAlg(AiLi, 2, 50, 0, 3) = (3\ 4\ 9\ 2\ 11\ 10\ 1\ 7\ 14\ 12\ 6\ 8\ 13\ 15\ 5\ 6.519 \times 10^4). \quad (3.8)$$

При горизонте, равном четырём, соответственно, имеем:

$$SecAlg(AiLi, 4, 50, 0, 2) = (3\ 13\ 9\ 4\ 2\ 8\ 10\ 12\ 6\ 7\ 14\ 5\ 11\ 15\ 1\ 4.009 \times 10^4), \quad (3.9)$$

$$SecAlg(AiLi, 4, 50, 0, 3) = (3\ 9\ 4\ 2\ 10\ 1\ 7\ 14\ 12\ 6\ 8\ 13\ 11\ 15\ 5\ 6.213 \times 10^4). \quad (3.10)$$

Сравнение приведенных результатов показывает, что выбор критерия в существенной степени влияет на выдаваемую очередность обслуживания ВС. При этом время вычислений для второго и третьего критериев (суммарные человеко-часы, проведенные пассажирами в аэропорту, и суммарные потери за все задержки) не намного больше по сравнению со временем для первого критерия.

Посмотрим теперь, в какой степени первоначальное расположение ВС в исходном списке влияет на конечные результаты. Казалось бы, естественной будет очередность, при которой первыми будут ВС с наибольшими «потерями». В исходном списке самолётов *Air* они указаны в нижней строке таблицы 3.1. Тогда исходный список (*Initial Priority*) может быть, например, таким:

$$InPr = (1\ 8\ 13\ 3\ 12\ 2\ 4\ 5\ 6\ 7\ 9\ 10\ 11\ 14\ 15).$$

Были получены следующие результаты для горизонта, равного трём:

$$SecAlg(InPr, 3, 50, 0, 1) = (13\ 4\ 2\ 8\ 1\ 12\ 6\ 3\ 10\ 9\ 11\ 15\ 7\ 14\ 5\ 39), \quad (3.11)$$

$$SecAlg(InPr, 3, 50, 0, 2) = (8\ 13\ 4\ 9\ 11\ 2\ 10\ 12\ 6\ 7\ 14\ 3\ 15\ 5\ 1\ 4.496 \times 10^4) . \quad (3.12)$$

$$SecAlg(InPr, 3, 50, 0, 3) = (8\ 13\ 4\ 9\ 11\ 2\ 10\ 1\ 7\ 14\ 12\ 3\ 6\ 5\ 15\ 6.399 \times 10^4). \quad (3.13)$$

Сравнение со значениями (3.1), (3.7) и (3.8) показывает, что значение первого критерия не изменяется, второго становится хуже, а третьего – лучше. Следовательно, нельзя утверждать, что рассматриваемая первоначальная очередность оказывает существенное влияние на значения критериев. Однако, сама очередность обслуживания ВС несколько изменяется.

3.6. Валидация ресурсно-временной оптимизации графиков работы бригад наземного обслуживания воздушных судов на модельном примере

Продолжим рассмотрение модельного примера, переходя к задаче составления графиков работы бригад по обслуживанию ВС. Напомним, что число видов обслуживания равно 6.

В рассматриваемом примере используются матрица расстояний между местонахождениями ВС, представленная в таблице 3.7, и матрица расстояний, преодолеваемых бригадами при их перемещении между ВС (таблица 3.8) .

Таблица 3.7 – Матрица расстояний D

η / η'	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	0	1	5	3	7	1	6	2	0	1	8	1	0	4
2	0	0	5	1	4	0	7	4	7	8	4	4	7	7	8
3	1	5	0	5	2	7	3	6	0	2	5	7	4	6	4
4	5	1	5	0	6	5	6	5	1	3	4	6	1	4	6
5	3	4	2	6	0	1	1	6	3	8	1	7	1	7	1
6	7	0	7	5	1	0	6	2	6	6	1	7	4	3	8
7	1	7	3	6	1	6	0	4	4	7	4	8	6	1	7
8	6	4	6	5	6	2	4	0	4	0	5	4	7	5	7

9	2	7	0	1	3	6	4	4	0	0	2	2	1	7	5
10	0	8	2	3	8	6	7	0	0	0	2	0	7	1	4
11	1	4	5	4	1	1	4	5	2	2	0	1	6	4	3
12	8	4	7	6	7	7	8	4	2	0	1	0	6	3	5
13	1	7	4	1	1	4	6	7	1	7	6	6	0	5	4
14	0	7	6	4	7	3	1	5	7	1	4	3	5	0	6
15	4	8	4	6	1	8	7	7	5	4	3	5	4	6	0

В таблице 3.8 в последнем столбце указана сумма всех таких расстояний. Эти данные выдаются *Оператором CriteriaB(GtbAll)*.

Таблица 3.8 – Расстояния $\{L_w\}$, преодолеваемые бригадами

w	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Σ
L_w	21	14	22	0	0	0	0	0	0	0	0	57

Время работы бригад и их число по видам обслуживания представлены в таблице 3.9. На основании этих данных формируются графики работы бригад $gB(i)$, где i – номер вида обслуживания: $i = 1, \dots, 6$. В таблице 3.9 представлен соответствующий массив для $i = 4$.

Таблица 3.9 – Фрагмент графика работы бригад по четвёртому виду обслуживания (массив $gB(i)$)

w/t	1	2	3	4	...	28	29	30	31	...	140	141	142	143
1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	0	...	0	0	0	0
2	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	0	...	0	0	0	0
3	0	0	0	0	...	0	0	-1	-1	...	0	0	0	0
...
9	0	0	0	0	...	0	0	0	0	...	-1	-1	-1	-1
10	0	0	0	0	...	0	0	0	0	...	-1	-1	-1	-1
11	0	0	0	0	...	0	0	0	0	...	-1	-1	-1	-1

Результат работы *Оператора* $gtB(GG, j, i, w, \tau)$ для списка $R34$, первого ВС ($j = 1$), второго вида обслуживания ($i = 2$) и первой бригады ($w = 1$) представлен в таблице 3.10. Исходным здесь является массив GG , выдаваемый оператором $Introd(R34, 0)$.

Таблица 3.10 – Фрагмент графика работы *Оператора* $gtB(Introd(R34, 0), 1, 2, 1, 0)$

w/t	1	2	3	...	...	86	87	89	90	...	140	141	142	143
1	-1	-1	-1		-1	0	0	0	0		0	0	0	0

8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Продолжение таблицы 3.11 – График состояния бригад graphicB для третьего вида обслуживания

w/t	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	6	-1	-1	-1	15	15	-1	-1	-1	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1
7	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 3.12 в транспонированном виде представляет результирующий массив номеров ВС, обслуживаемых каждой бригадой. Этот массив выдаётся Оператором *TabASB(GtbAll)*.

Таблица 3.12 – Список номеров ВС, обслуживаемых бригадами

w = 1	w = 2	w = 3	w = 4	w = 5	w = 6	w = 7	w = 8	w = 9	w = 10	w = 11
1	2	9	0	0	0	0	0	0	0	0
4	8	3	0	0	0	0	0	0	0	0
10	14	12	0	0	0	0	0	0	0	0
7	11	6	0	0	0	0	0	0	0	0
13	5	15	0	0	0	0	0	0	0	0

3.7. Взаимодействие подсистем АС «КОБРА-2» с модулями ресурсно-временной оптимизации оперативного управления аэропортом в сбойной ситуации

Как отмечалось ранее, одними из основных причин нарушения регулярности полетов являются ССА, устранением которых занимается оперативный штаб. При этом необходимо оперативно корректировать планы и

графики использования статических и динамических ресурсов АП (рисунок 1.10), учитывая разнообразные факторы: наличие самих ресурсов; операции по ТО рейсов по отправлению; нормативы и задержку выполнения операций; и др.

В АС «КОБРА-2» такие корректировки в ССА осуществляются на основе подсистем и модулей, представленных на рисунке 3.1.

К ним относятся:

- модуль «СПП ССЭ», встроенный в подсистему «СПП», реализующий эвристический алгоритм определения очередности самолетовылетов;
- модуль «СПП-ССО», встроенный в подсистему «СПП», реализующий расчеты ресурсно-временной оптимизации очередности отправления на базе аналитической модели ВС;
- модуль «УР-ССО», встроенным в подсистему «УР», реализующий расчеты ресурсно-временной оптимизации графиков работы бригад служб (операторов) аэропорта на базе аналитической модели.

Автоматизированные средства АС «КОБРА-2» для оперативного управления процессами в аэропорту и взаимодействие ее подсистем при выходе из ССА, представлена на рисунке 3.1 [28].

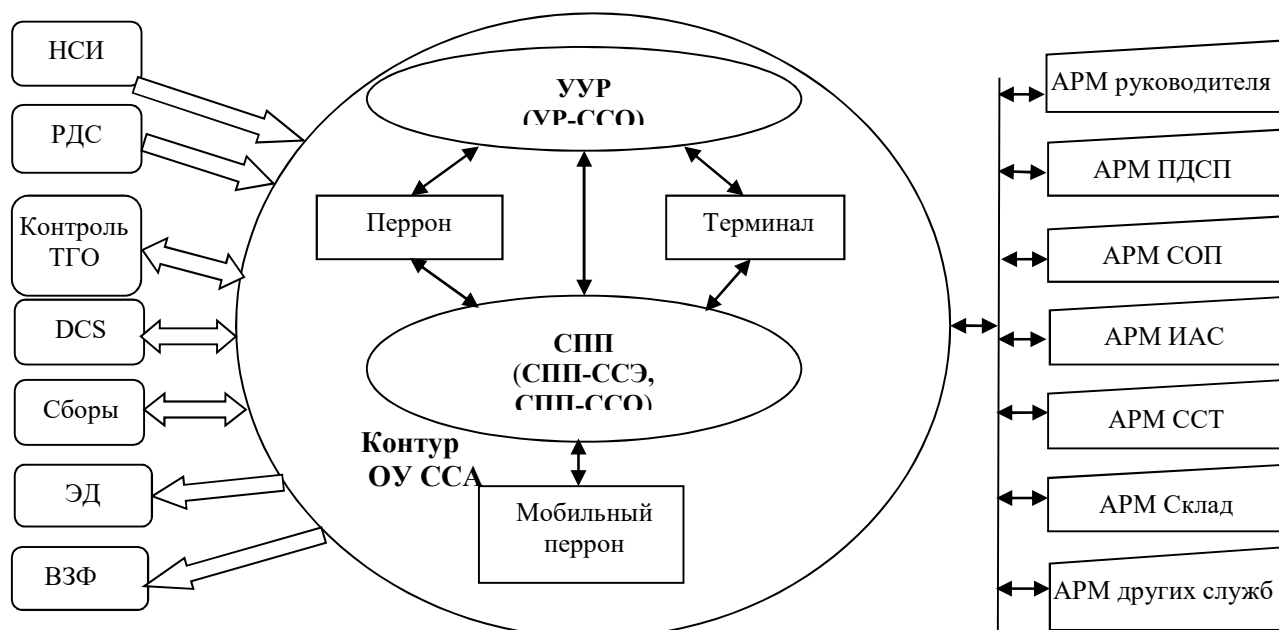


Рисунок 3.1 – Взаимодействие подсистем АС «КОБРА-2» и используемые АРМ при ОУ в ССА

Выводы по главе 3

1. На базе разработанных аналитических моделей (глава 2) автоматизирован расчет ресурсно-временной оптимизации очередности подготовки ВС, обеспечивающий оптимизацию процесса вычислений и выдачу результатов на АРМы пользователей.

2. Описано ИО и технология оптимизационных расчетов, внедренная в модулях «ССП-ССО» и «УР-ССО», которые автоматизируют ресурсно-временную оптимизацию процессов ОУ выходом из ССА.

3. Проведена валидация разработанных методов на модельном примере, свидетельствующая об их адекватности и эффективности.

4. Разработанная двухуровневая модель и пакет компьютерных программ в совокупности образуют новый аналитический метод ресурсно-временной оптимизации очередности подготовки ВС к вылету и графиков работы бригад при их обслуживании в ССА.

Глава 4. ИМИТАЦИОННЫЙ МЕТОД РЕСУРСНО-ВРЕМЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ БРИГАД ПО ОБСЛУЖИВАНИЮ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

4.1. Общие принципы разработки имитационного метода

Настоящая глава посвящена разработке и практической реализации имитационного метода ресурсно-временной оптимизации процесса ОУ работой бригад по НО ВС, в основу которого положены:

- имитационная модель, учитывающая стохастический характер процесса пооперационного обслуживания ВС;
- модуль автоматизации имитационных расчетов;
- методика применения модели.

Процесс обслуживания конкретного ВС, ранее рассмотренный в главах 2 и 3, имел вспомогательное значение, а теперь – это конечный результат, согласно которому должна быть организована работа служб аэропорта. В силу сложности рассматриваемых процессов, аналитическое моделирование в этих случаях практически невозможно, поэтому используется *имитационное моделирование*.

Разработанная модель носит универсальный характер и может использоваться как в случаях сбойных ситуациях в аэропорту, так и штатных ситуациях при расчете сетевых графиков обслуживания ВС на планируемый период. В частности, с помощью разрабатываемой имитационной модели могут быть решены следующие задачи:

- а) оценка адекватности аналитических моделей ресурсно-временной оптимизации графиков технического обслуживания ВС с учетом случайного характера времен выполнения операций;
- б) оптимизации графиков работы бригад в штатных условиях работы аэропорта по текущему СПП;

в) ресурсно-временного распределения ресурсов аэропорта на начало выхода из сбойной ССА в условиях повышенной сложности, например, в условиях большого скопления ВС в аэропорту и недостатка ресурсов для их обслуживания;

г) в комплексе с аналитической моделью, обеспечивающей ресурсно-временную оптимизацию очередности отправления ВС, для оперативного управления ресурсами аэропорта в ССА.

Разработка имитационной модели в настоящей главе базируется как на классических принципах, изложенных в [21, 74, 88], так и на известных работах отраслевых ученых [23, 45, 51-55, 86, 87]. Однако предлагаемые в прикладных работах имитационные модели не учитывают динамику состояния ресурсов, необходимых для обслуживания ВС (бригад, средств механизации и пр.), и территориальное расположение ВС на перроне. Кроме того, в них не учитывается все множество ВС, простаивающих в аэропорту в результате ССА.

При разработке имитационной модели предполагено, что очерёдность обслуживания ВС определена.

В разработанной модели учитываются следующие факторы.

- 1) Типы ВС и виды их обслуживания.
- 2) Сетевые графики технического и коммерческого обслуживания ВС.
- 3) Суточная динамика состояния ресурсов, необходимых для обслуживания (бригад, средств механизации и пр.).
- 4) Территориальное расположение ВС на перроне.
- 5) Случайные факторы, приводящие к изменению нормативных продолжительностей обслуживания и перемещению динамических ресурсов.

Последовательность изложения материалов в этой главе такая. В разделе 4.2 описывается используемое информационное обеспечение модели. Раздел 4.3 посвящён расчёту сетевого графика обслуживания. В разделе 4.4 описываются методы имитации выполнения операций сетевого графика, в частности, генерация случайных величин с заданным распределением. Автоматизация ресурсно-временной оптимизации процесса оперативного

управления бригадами по обслуживанию ВС при подготовки ВС к вылету представлена в разделе 4.5.

В разделе 4.6 представлена методика применения разработанной имитационной модели с листингами операторов (программ), имитирующих соответствующие процедуры подготовительных, промежуточных и результирующих расчетов при оптимизации показателей сетевых графиков бригадами наземного обслуживания ВС.

Как отмечено в главе 3, для целей разработки и реализации имитационной модели *использована вычислительная среда Mathcad*, что отличает данную модель от других подобных отраслевых моделей в части простоты реализации и, при необходимости, – модификации. В модели в отличие от других, подобных, можно оптимизировать ТО по любому из выбранных критериев эффективности (например, 2.16, 2.17) и по всему парку обслуживаемых ВС с учетом стохастического характера операций обслуживания, динамически меняющихся ресурсов во времени и местоположения ВС на перроне.

4.2. Организация информационного обеспечения имитационной модели

В имитационной модели в основном используется информационное обеспечение, описанное в главе 3. В ряде случаев содержание прежних массивов частично изменено. Опишем эти изменения.

В массиве *Air* изменено содержание последней строки. Теперь это – номер места стоянки ВС. Как и ранее, первая строка содержит порядковые номера ВС, а вторая – их типы. Для рассматриваемых в этой главе задач содержание третьей и четвертой строки не используется. Пример конкретной версии этого массива (с идентификатором *AirList*) представлен в таблице 4.1. Из неё видно, что для десятого самолёта тип $AirList_{2,10} = 3$, а место стоянки $AirList_{4,10} = 4$.

Таблица 4.1 – Массив *AirList*

<i>Air</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>Air</i> ₂	1	3	4	2	1	5	5	4	2	3	3	4	2	5	3

График состояния бригад $ggBt(\rho)$ (всего рассматривается 4 бригады) имеет вид, представленный таблице 4.2.

Таблица 4.2 – График состояния бригад $ggBt(1)$

<i>i/t</i>	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-1	-101	101	101	101	-202	202	202
2	-1	-102	102	102	-201	201	201	201
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>i/t</i>	9	10	11	12	13	13	15	16
1	-301	301	301	301	-502	502	502	-1
2	-302	302	302	-401	401	401	401	-402
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>i/t</i>	17	18	19	20	21	22	23	24
1	-121	121	121	-1	-1	-1	-1	-1
2	402	402	-501	501	501	501	-1	-1
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>i/t</i>	33	34	35	36	49	50	51	52
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	-221	221	221	-1	-521	521	521	-1
4	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
<i>i/t</i>	57	58	59	60	61	62	142	143
1	0	0	0	0	0	0	-9	5.016×10^3
2	0	0	0	0	0	0	-9	5.023×10^3
3	-321	321	321	-1	-1	-1	-9	5.052×10^3
4	-1	-1	-421	421	421	-1	-7	4.062×10^3

Столбцы соответствуют моментам времени суток, равноотстоящим на 5 минут, т. е. на 1/12 часа. Строки соответствуют бригадам. В массиве $ggBt(\rho)$ представлены бригады одного профиля (ресурса), номер которого ρ . В массиве $ggBtAll$ представлены все бригады, в порядке номеров их профилей $\rho = 1, 2, \dots$. Значение содержимого одной клетки следующее. Ноль означает, что в это время бригада не работает, а -1 означает, что бригада имеется в наличии, но не работает. Трёхзначное ZYX или четырёхзначное $WZYX$ число означает, что на

ВС с номером Z или WZ проводится работа с номером YX . Далее в таблице 4.4 будет приведено описание работы с этим номером. Знак минус перед числами ZYX или $WZYX$ означает, что бригада движется к месту стоянки ВС. В каждой строке предпоследняя клетка (с номером 142) содержит место нахождения бригады (согласно нумерации таблицы 4.2), записанное с обратным знаком. Если это число равно -16 (т.е. по модулю больше числа мест стоянок), то это означает, что бригада ещё только начинает работать. В этом случае считается, что бригада заблаговременно прибывает к месту проведения своей первой работы. Последняя клетка (с номером 143) содержит момент времени TT окончания последней выполненной бригадой работы на ВС с номером Z или WZ . Формат записи следующий: ZTT или $WZTT$.

Расстояния между местами стоянок ВС содержатся в массиве D , представляющего собой квадратную матрицу. На пересечении i -ой строки и j -го столбца матрицы записано расстояние $D_{i,j}$ от i -ой стоянки до j -ой стоянки. Пример массива представлен в таблице 4.3.

Принципиально новыми являются *сетевые графики технологического и коммерческого обслуживания ВС*, описания которых приведено ниже. Сетевой график составляется для каждого типа ВС и бывает двух видов.

Типовой сетевой график не привязывается к конкретным календарным строкам; начало отсчёта времени ведётся с нуля, за который принимается момент начала обслуживания рейса.

Таблица 4.3 – Массив D2 расстояний между местами стоянок самолётов

$$D2 := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 5 & 3 & 7 & 1 & 6 & 2 & 0 & 1 & 8 & 1 & 0 & 14 \\ 0 & 0 & 5 & 1 & 4 & 0 & 7 & 4 & 7 & 8 & 4 & 4 & 7 & 7 & 8 \\ 1 & 5 & 0 & 5 & 2 & 7 & 3 & 6 & 0 & 2 & 5 & 7 & 4 & 6 & 4 \\ 5 & 1 & 5 & 0 & 6 & 5 & 6 & 5 & 1 & 3 & 4 & 6 & 1 & 4 & 6 \\ 3 & 4 & 2 & 6 & 0 & 1 & 9 & 6 & 3 & 8 & 1 & 7 & 1 & 7 & 1 \\ 7 & 0 & 7 & 5 & 1 & 0 & 6 & 2 & 6 & 6 & 1 & 7 & 4 & 3 & 8 \\ 1 & 7 & 3 & 6 & 9 & 6 & 0 & 4 & 4 & 7 & 4 & 8 & 6 & 1 & 7 \\ 6 & 4 & 6 & 5 & 6 & 2 & 4 & 0 & 4 & 0 & 5 & 4 & 7 & 5 & 7 \\ 2 & 7 & 0 & 1 & 3 & 6 & 4 & 4 & 0 & 0 & 2 & 2 & 1 & 7 & 5 \\ 0 & 8 & 2 & 3 & 8 & 6 & 7 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 7 & 11 & 4 \\ 1 & 4 & 5 & 4 & 1 & 1 & 4 & 5 & 2 & 2 & 0 & 1 & 6 & 4 & 3 \\ 8 & 4 & 7 & 6 & 7 & 7 & 8 & 4 & 2 & 0 & 1 & 0 & 6 & 3 & 5 \\ 1 & 7 & 4 & 1 & 1 & 4 & 6 & 7 & 1 & 7 & 6 & 6 & 0 & 5 & 4 \\ 0 & 7 & 6 & 4 & 7 & 3 & 1 & 5 & 7 & 11 & 4 & 3 & 5 & 0 & 6 \\ 14 & 8 & 4 & 6 & 1 & 8 & 7 & 7 & 5 & 4 & 3 & 5 & 4 & 6 & 0 \end{pmatrix}$$

Оперативный сетевой график, в котором за нулевой момент времени принимается фактическое календарное время начала обслуживания рейса. Структура обоих графиков аналогична и является следующей.

Как обычно, сетевой график представляет собой ориентированный ациклический граф, состоящий из *вершин* и *дуг*. Вершины соответствуют *событиям* процесса обслуживания, а дуги – отдельным *работам* по обслуживанию. Все вершины (события) пронумерованы натуральными числами от 1 до k , так что общее их число равно k . Дуги имеют *ориентацию*, указанную стрелкой, и ведут от одной вершины к другой. Для данной работы *начальное событие* – это та вершина, из которой выходит соответствующая дуга, а *конечное событие* – в которую входит дуга. Наступление данного события означает, что выполнены все работы, для которых оно является конечным. В

свою очередь, после наступления данного события могут быть начаты все работы, для которых оно является начальным.

Работы идентифицируются следующим образом.

В-первых, номерами двух событий: начального и конечного для работы. Предполагается, что общее число событий не более 98, так что на номер события выделяется два десятичных разряда, а на код работы – 4 разряда. Например, работа 0215 означает, что для неё начальным событием является второе, а конечным – 15-ое.

Во-вторых, в работе задействован ресурс. Если это необходимо учитывать, то к коду работы дополняется номер используемого ресурса. Если при выполнении работы одновременно используется несколько ресурсов, то кодов работы будет несколько – каждый для своего ресурса.

Отметим, что в представленной версии предполагается, что в работе используется только один ресурс. Это не является существенным ограничением, поскольку более общий случай можно свести к этому частному случаю. Действительно, если в работе (i, j) используются два вида ресурсов ρ_1 и ρ_2 , то можно ввести два дополнительных промежуточных события v и w , и рассмотреть работы (i, v) и (v, j) с одним ресурсом ρ_1 , с одной стороны, и работы (i, w) и (w, j) с одним ресурсом ρ_2 , с другой стороны.

Описанные здесь данные – информация раздела 3.2 – Организация информационной базы, и соответствующие технологии обслуживания ВС достаточны для составления типовых сетевых графиков обслуживания. При составлении Оперативных графиков используются описанные в разделе 3.2 массивы данных R_1 и R_2 , Информация о располагаемых ресурсах, массив Se Информация об используемых ресурсах (об обслуживании), График располагаемых ресурсов gg и График состояния ресурсов $graphic$.

Типовой сетевой график обслуживания конкретного ВС представлен массивом $List$ (таблица 4.4). В нём столбцы соответствуют работам.

Столбец последовательно содержит следующие показатели, записываемые в отдельных строках.

- 1) Порядковый номер работы.
- 2) Номер начального события i .
- 3) Номер заключительного события j .
- 4) Код потребляемого ресурса ρ .
- 5) Объём потребляемого ресурса h_{ij} .
- 6) Длительность выполнения операции $d_{ij} = t_{ij} - \underline{t}_{ij}$.

Первые четыре показателя являются идентификатором операции, а два последних – её характеристиками. Пример массива представлен в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Массив списка работ *List*

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	2	2	2	2	3	4	4	5	6	6	6	7
2	3	4	3	5	6	6	8	7	8	10	7	8	9	10
1	1	2	2	3	4	6	5	5	6	6	4	4	5	2
2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1
18	12	19	14	16	19	18	12	39	10	17	17	22	18	18

Продолжение таблицы 4.4 – Массив списка работ *List*

16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
8	8	8	9	9	9	10	10	10	11	11	11	12	13	14
9	10	11	10	11	13	11	13	14	12	13	14	14	15	15
4	4	6	5	4	1	3	3	2	2	2	3	5	4	6
1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1
14	15	13	18	16	12	19	21	18	13	14	13	12	19	12

Массив списка работ *List* составляется для каждого типа ВС и вида обслуживания. Более того, он может составляться специально под конкретный рейс. Однако, в рассматриваемых модельных примерах, для уменьшения объёма работы по подготовке исходной информации, принят другой подход. А именно, используется единый сетевой график обслуживания, соответствующий таблице 4.4. Специфика каждого типа ВС учитывается коэффициентом $tcoef$, на который умножаются продолжительности выполнения работ, приведенные в этой таблице. Значения этих коэффициентов содержатся в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Множительные коэффициенты для длительностей выполнения работ

Тип ВС	1	2	3	4	5
Кэфф., $tcoef$	0.90	0.95	1.00	1.10	1.20

4.3. Автоматизация расчёта сетевого графика работы бригад по наземному обслуживанию воздушных судов

Основной процедурой имитационной модели является расчёт продолжительности обслуживания рейса согласно сетевому графику [59], для которого продолжительности выполнения всех работ известны. Как уже отмечалось в разделе 4.2, эти продолжительности являются случайными величинами, вырабатываемыми в процессе моделирования. Этому будет посвящён раздел 4.4. Сейчас же принимается, что они уже выработаны и известны. Кроме того, рассматривается какой-то конкретный тип ВС и вид обслуживания.

Введём необходимые обозначения для описания сетевого графика. Пусть $V = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ есть множество вершин (событий), а $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ – множество дуг (работ). Обозначим $E^+(v)$ и $E^-(v)$ – множество дуг, входящих и выходящих для вершины v , а $v^-(e)$ и $v^+(e)$ – начальную и конечную вершины для дуги e . Кроме того считаются известными длины дуг $d(e)$, $e \in E$, т.е. длительности выполнения работ.

Обычно вся информация графика задаётся в виде *матрицы длин дуг* $Dist = (d_{ij})$. Это – квадратная матрица, строки и столбцы которой соответствуют вершинам $v_i \in V$. На пересечении i -й строки и j -го столбца стоит длина d_{ij} дуги, ведущей от вершины v_i к вершине v_j . Если такой дуги нет, то ставится какой-то символ, означающий отсутствие дуги.

Известно, что *время выполнения всех работ сетевого графика* – это *длина самого длинного пути из начальной вершины v_1 в конечную вершину v_k* . Такой путь называется *критическим* (он может быть неединственным). *Деревом критических путей* называется дерево с корнем v_1 , которое содержит критические пути до всех вершин, достижимых из v_1 . Опишем простой алгоритм вычисления критического пути и его длины.

Алгоритм нахождения дерева критических путей и их длин.

Вход. Матрица длин дуг $Dist = (d_{ij})$.

Выход. Дерево критических путей и их длины.

Метод. Для каждой вершины $v_i \in V$ вводятся две метки:

- 1) L_i – длина самого длинного пути от вершины v_i до вершины v_b , известная к данному моменту времени работы алгоритма;
- 2) T_i – предпоследняя вершина в данном пути, от которой ведёт дуга к вершине v_i .

Алгоритм расчета.

Шаг 0. Полагаем $L_i = 0$ для всех i и $n=1$.

Шаг n. Организуем внешний цикл по $i = 1, 2, \dots, k-1$ и внутренний цикл по $j = i+1, i+2, \dots, k$. Для каждой пары вершин с номерами i и j проверяем, существует ли дуга, ведущая из вершины v_i в вершину v_j . Если существует, то проверяется строгое неравенство:

$$L_i + d_{i,j} > L_j. \quad (4.1)$$

Если неравенство выполняется, то это означает, что путь до вершины v_j , проходящий через вершину v_i и содержащий упомянутую дугу, будет длиннее существующего пути (если таковой имеется).

В этом случае полагаем

$$L_j = L_i + d_{i,j}, \quad T_j = i. \quad (4.2)$$

Если после завершения внешнего цикла окажется, что изменений в векторах $T = (T_1, T_2, \dots, T_k)$ и $L = (L_1, \dots, L_k)$ не произошло, то – конец работы алгоритма. Вектор T описывает дерево самых длинных путей от вершины v_1 , а вектор L – их длины. Действительно, в ориентированном дереве в каждую вершину (кроме корня дерева, т.е. начальной вершины) входит ровно одна дуга. Она указана в массиве T .

Если изменения в векторах T и L имели место, то полагаем $n = n+1$ и переходим к шагу n . В противном случае – конец работы алгоритма.

Приведенный алгоритм является весьма универсальным, однако быстрое действие его не является достаточным. Усовершенствовать алгоритм

можно за счёт ограничения его общности. В частности, можно потребовать, чтобы нумерация вершин была правильной. В этом случае каждая дуга ведёт от вершины с меньшим номером к вершине с большим номером. В далее приведенном алгоритме используется массив из двух строк $Prec(j, List)$. Первая строка содержит множество вершин, из которых ведут дуги к вершине j в графе, задаваемом списком $List$. Вторая строка содержит номера ресурсов, потребных для выполнения соответствующих работ. Множество $Prec(j, List)$ формируется одноимённым оператором (П2.2). Будем вершины из $Prec(j, List)$ называть *предшествующими* вершине j .

Второй алгоритм нахождения дерева критических путей.

Вход. Матрица длин дуг $Dist = (d_{i,j})$.

Выход. Длины $\{L_i\}$ критических путей от начальной вершины v_1 до всех вершин, достижимых из v_1 .

Метод. Вершины $v_j \in V$ просматриваются в порядке их нумерации. Для очередной вершины с номером j для всех предшествующих вершин уже известны наибольшие длины до них от начальной вершины. Это позволяет определить длину критического пути до вершины v_j .

Алгоритм.

Шаг 0. Полагаем $L_1 = 0$, $j = 2$.

Шаг j . Организуем цикл по вершинам из множества $Prec(j, List)$. Для очередной вершины v_i определяем, имеется ли дуга из вершины v_i в вершину v_j . Если нет, то переходим к следующему значению из множества $Prec(j, List)$. Если да и $d_{i,j}$ есть длина этой дуги, то вычисляем длину пути до v_j , проходящего через вершину v_i :

$$\tilde{L}_j = L_i + d_{i,j}$$

Наибольшее из этих значений и даёт длину критического пути до вершины v_j . Дуга, соответствующая этой длине, вводится в дерево критических путей.

Если просмотрены не все вершины, то переходим к шагу $j = j + 1$. Иначе – конец работы алгоритма.

4.4. Имитация распределений продолжительности выполнения операций сетевого графика и оценивание неизвестных параметров распределений

Генерация случайных величин с заданным распределением. При расчёте продолжительности выполнения всех работ сетевого графика предполагалось, что продолжительности выполнения отдельных работ заданы. Фактически эти продолжительности были предварительно проимитированы согласно их распределениям вероятностей. Каждая работа включает ряд операций, проводимых различными службами аэропорта. Она будет выполнена, когда будут выполнены все составляющие её операции. Согласно изложенному в разделе 4.2, все операции по данной работе начинаются одновременно. Длительность каждой операции является случайной величиной. Следовательно, длительность выполнения работы – это максимум из этих случайных величин.

Существуют два подхода к имитации максимума из случайных величин. Первый состоит в том, что вначале имитируется (генерируется) длительность выполнения каждой операции, а потом находится максимум из выработанных длительностей. Второй подход заключается в том, что вначале находится распределение максимума на основе заданных распределений для длительностей операций. Затем вырабатывается (генерируется) случайная величина согласно найденному распределению.

Далее будут использованы оба подхода. В обоих присутствует процедура *генерации случайных величин*. Эта процедура реализуется в пакетах прикладных компьютерных программ так называемыми «генераторами случайных величин». Ниже описывается классический метод генерации, называемый *методом обратной функции распределения*.

Пусть X является случайной величиной с функцией распределения $F(x) = P\{X \leq x\}$, а R является случайной величиной, имеющей равномерное

распределение в интервале $(0, 1)$. Значения R вырабатываются специальным генератором. Теперь случайная величина X генерируется таким образом:

$$X = F^{-1}(R), \quad (4.3)$$

где $F^{-1}(R)$ есть функция, обратная к функции $F(x)$.

Обратная функция однозначная, если $F(x)$ является непрерывной функцией. Если функция $F(x)$ дискретна, то в точках её скачков следует брать нижнюю границу возможных значений.

Для некоторых распределений $F(x)$ удаётся получить явное выражение для формулы (4.3). Приведём некоторые из них [22, 25].

Равномерное распределение в интервале (α, β) :

$$F(x) = \frac{x - \alpha}{\beta - \alpha}, \quad \alpha \leq x \leq \beta, \quad X = \alpha + R(\beta - \alpha).$$

Экспоненциальное распределение с параметром $\lambda > 0$:

$$F(x) = 1 - \exp(-\lambda x), \quad x \geq 0, \quad X = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - R).$$

Распределение Эрланга с параметрами $\lambda > 0$ и $m = 1, 2, \dots$:

$$F(x) = 1 - \sum_{i=0}^{m-1} \lambda^i \frac{1}{i!} \exp(-\lambda x), \quad x \geq 0, \quad X = \sum_{i=1}^m Z_i,$$

где Z_1, \dots, Z_m - независимые экспоненциально распределённые с параметром λ случайные величины, вырабатываемые согласно предыдущему пункту.

Для ряда важных распределений явного выражения для выработки соответствующих случайных величин не существует. В этом случае используются специальные алгоритмы. Приведём некоторые из них.

β -распределение с параметрами $a, b, u, v (a < b, u > 0, v > 0)$:

$$F(x) = I_{\frac{x-a}{b-a}}(u, v),$$

где $I_w(u, v)$ – выражается через β -функцию

$$\beta(u, v) = \int_0^1 z^{u-1} (1-z)^{v-1} dz$$

по формуле

$$I_w(u, v) = \frac{1}{\beta(u, v)} \int_0^w z^{u-1} (1-z)^{v-1} dz, \quad 0 \leq w \leq 1.$$

Простейшим алгоритмом генерации соответствующих случайных величин является алгоритм Йонки. Он включает следующие шаги.

Шаг 1. Вырабатывается два независимых случайных числа R_1 и R_2 , равномерно распределённых в интервале $(0, 1)$.

Шаг 2. Вычисляются

$$V = \sqrt[u]{R_1}, \quad W = \sqrt[v]{R_2}.$$

Шаг 3. Если $V + W < 1$, то переход на шаг 4, иначе – на шаг.

Шаг 4. Полагаем $X = V/(V + W)$.

Нормальное распределение с параметрами μ и $\sigma (\sigma > 0)$:

$$F(x) = \Phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right), \quad -\infty \leq x \leq \infty,$$

где $\Phi(z)$ есть функция Лапласа

$$\Phi(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}u^2\right) du.$$

Нормально-распределённая случайная величина X_0 с нулевым средним $\mu = 0$ и единичной дисперсией $\sigma^2 = 1$ вырабатывается как сумма достаточно большого числа независимых равномерно распределённых в интервале $(0, 1)$ случайных величин R_1, \dots, R_n :

$$X_0 = \sqrt{\frac{12}{n}} \left(\sum_{i=1}^n R_i - \frac{n}{2} \right).$$

Нормально-распределённая случайная величина X с произвольными средним μ и дисперсией σ^2 вырабатывается по формуле

$$X = \mu + \sigma X_0.$$

Распределение смеси. При выполнении определённой операции кроме заранее предусмотренных (регламентных) работ, приходится выполнять неплановые работы, вызванные выявленными отказами и неисправностями авиационной техники. Пусть X_0 есть время выполнения регламентных работ (случайная величина), X_1 есть время выполнения неплановых работ (случайная величина). Если неплановые работы появляются с вероятностью p , то общее время выполнения операции X будет таким:

$$X = \begin{cases} X_0 & \text{with probability } 1-p, \\ X_0 + X_1 & \text{with probability } p. \end{cases} \quad (4.4)$$

Распределение максимума и минимума из независимых случайных величин. При одновременном выполнении нескольких операций со случайными длительностями выполнения, часто интерес представляет максимальная или минимальная длительность. Первый случай возникает, если все операции должны быть выполнены. Второй – когда достаточно выполнение одной из операций (поиск неисправности по разным направлениям). Пусть X_1, \dots, X_n – независимые случайные величины с функциями распределения $F_1(x), \dots, F_n(x)$, X_{max} и X_{min} – максимум и минимум из них. Если генерация X_1, \dots, X_n осуществлена, то генерация X_{max} и X_{min} осуществляется очевидным способом:

$$X_{max} = \max\{X_1, \dots, X_n\}, X_{min} = \min\{X_1, \dots, X_n\}.$$

Соответствующие функции распределения такие:

$$F_{max}(x) = P\{X_{max} < x\} = 1 - (1 - F_1(x))(1 - F_2(x)) \dots (1 - F_n(x)),$$

$$F_{min}(x) = P\{X_{min} < x\} = F_1(x)F_2(x) \dots F_n(x).$$

Два последних примера подсказывают общее правило генерации значения Y известной функции $h(x_1, \dots, x_n)$ независимых случайных величин X_1, \dots, X_n . Надо просто сгенерировать значения случайных величин X_1, \dots, X_n и подставить их в функцию вместо независимых переменных:

$$H = h(X_1, \dots, X_n).$$

Другие полезные для исследований сведения о распределениях случайных величин, а также методах их генерации, использованные диссертантом, приведены в работах [22, 25, 112, 113].

В заключении этого подраздела остановимся на вопросе оценивания неизвестных параметров распределений. Пусть неизвестными параметрами

является θ_1 , если параметр единственный, или θ_1 и θ_2 неизвестных параметра два. Их оценки будем обозначать θ_1^* и θ_2^* , соответственно. Эти оценки вычисляются на основе эмпирических значений математического ожидания μ^* и дисперсии σ^{2*} (или среднего квадратического отклонения σ^*), подсчитанных по выборке X_1, \dots, X_n :

$$\mu^* = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n X_i, \quad \sigma^{2*} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu^*)^2, \quad \sigma^* = \sqrt{\sigma^{2*}}.$$

Они приведены в таблице 4.6 (При описании распределения Эрланга символ $\langle a \rangle$ означает целое число, ближайшее к a).

Таблица 4.6 – Оценки параметров распределений

Распределение	θ_1	θ_2	θ_1^*	θ_2^*
Равномерное	α	β	$\mu^* - \sqrt{3}\sigma^*$	$\mu^* + \sqrt{3}\sigma^*$
Экспоненциальное	λ	-	$1/\mu^*$	-
Эрланга*	m	λ	$\left\langle \frac{(\mu^*)^2}{\sigma^{2*}} \right\rangle$	$\frac{m^*}{\mu^*}$
β -распределение	u	v	$\frac{\mu^* - a}{b - a} \times$ $\times \left(\frac{(\mu^* - a)(b - \mu^*)}{\sigma^{2*}} - 1 \right)$	$\frac{b - \mu^*}{b - a} \times$ $\left(\frac{(\mu^* - a)(b - \mu^*)}{\sigma^{2*}} - 1 \right)$
Нормальное	μ	σ	μ^*	σ^*

К сказанному добавим, что в случае смеси распределений неизвестная вероятность p оценивается частотой p^* появления дополнительных работ.

4.5. Автоматизация планирования процесса подготовки воздушных судов к вылету

Автоматизация обработки информации. Оператор $ggB(\rho)$ составляет одноимённый массив *График состояния бригад* ρ -го вида на основании информации массивов $R1$ и $R2$. Он аналогичен оператору gg , описанному в предыдущей главе. Оператор $TotalggB$ объединяет информацию для всех видов ресурса ρ в один массив. В пополненном массиве $ggBtAll$ представлены все бригады, в порядке номеров их профилей $\rho = 1, 2, \dots$

Оператор $CorrStBr(GG, NBrig, Rez)$ корректирует состояние бригады с номером $NBrig$ в массиве состояния бригад GG . Это осуществляется путём замены строки с номером $NBrig$ массива GG на строку Rez .

Оператор $PrecW(j, List)$ (листинг П2.2) выдаёт список работ (i, j) , завершающихся событием j .

Для поиска нужной записи (столбца) в массиве $List$ используется матрица $Medzero$:

$$Medzero := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

При умножении слева матрицы $List$ на $Medzero$ выделяются идентификатор (i, j, ρ) , указывающий на работу (i, j) и используемый ресурс ρ . Этот идентификатор используется для проверки того, что проводится рассматриваемая работа и конкретный ресурс.

Оператор $ggB\rho(\rho, GGG)$ (листинг П2.3) из общего массива GGG выделяет подмассив, относящийся к бригадам ρ -го вида.

Оператор $ggB\rho In(\rho, GGG, ggBNew)$ (листинг П2.4) вставляет в общий массив состояния бригад GGG массив $ggBNew$, содержащий информацию о бригадах ρ -го ресурса.

Автоматизация построения и ведения графиков обслуживания ВС и состояния ресурсов (бригад). Важнейшим здесь является *Оператор* $PerWork(GG, D, Reis, List, i, j, \rho, \tau)$, (листинг П2.5). Этот оператор планирует выполнение работы (i, j) после времени τ из списка работ $List$, провозимых на рейсе $Reis$.

Расчет осуществляется с учётом текущей загрузки бригад ресурса ρ , представленной в массиве GG , а также расстояния между местами стоянок самолётов (массив D). Все эти параметры являются формальными. Вместо них при обращении к Оператору используются фактические идентификаторы. В частности, для массива GG таковым будет массив $ggBt(\rho)$ – см. таблицу 4.2.

Организуется два встроенных цикла: внешний по бригадам (им соответствуют строки GG); внутренний – по времени суток. Напомним, что в предпоследней записи каждой строки массива указывается местонахождение бригады (со знаком минус). На основании этого с помощью массива D вычисляется время $\Delta 1$, необходимое для перемещения бригады к месту стоянки ВС $Reis$. Началом просмотра соответствующей строки является момент времени $\tau - \Delta 1$. Время $\Delta 2$ выполнения работы (i, j) бригадой берётся из массива $List$. Находится первый интервал длины $\Delta = \Delta 1 + \Delta 2$, в течение которого бригада свободна. Запоминается начало этого интервала t и номер бригады.

После просмотра всех бригад на обслуживание назначается бригада, для которой время начала t наименьшее. После этого корректируется строка массива GG , соответствующая выбранной бригаде. А именно, в соответствующих тактах времени будут записаны номер ВС и номер выполненной работы. Для тактов, соответствующих времени перемещения бригады, эта информация записывается со знаком минус. В предпоследней записи (такте) строки записывается новое местонахождение бригады. Далее

Оператор $CorrStBr(GG, NBrig, Rez)$ вводит в массив GG вместо старой строки обновлённую строку Rez .

Оператор $PerNetCh(Reis, D, ggBtAll, List, \tau)$ составляет сетевой график всех видов обслуживания для ВС $Reis$ (листинг П2.6). Новым здесь является

массив $ggBtAll$, содержащий информацию о текущем состоянии каждой из бригад ρ , а также всех бригад в совокупности (см. выше Раздел 3.6). Результатом работы оператора является обновлённый массив $ggBtAll$, именуемый в операторе как $ggBtAllNew$. В процессе работы оператора организуется цикл по работам (i, j) , представленным в массиве $List$.

Для данной работы определяется потребный ресурс ρ , и для этого ресурса из массива $ggBtAll$ с помощью оператора $ggB\rho(\rho, ggBtAll)$ выписывается информация GG о состоянии соответствующих бригад. Далее происходит обращение к оператору $PerWork(GG, D, Reis, List, i, j, \rho)$, который выдаёт обновлённое состояние бригад данного ресурса $ggBNew$. Оператор $ggB\rho In(\rho, ggBtAllNew, ggBNew)$ вводит эту информацию в массив $ggBtAllNew$, который является выходным.

Оператор $PerAll(Airlist, D, ggBtAll, List, \tau)$ составляет сетевой график всех видов обслуживания для всех самолётов списка $Airlist$. Это осуществляется путём многократного обращения к оператору $PerNetCh(Reis, D, ggBtAll, List, \tau)$.

Массив состояний всех бригад $ggBtAll$, выдаваемый оператором $PerAll(Airlist, D, ggBtAll, List, \tau)$, является основой информационного обеспечения для результирующих расчетов.

Автоматизация результирующих расчетов для выдачи массивов производственного характера. Перечислим используемые для этой цели операторы и приведем примеры расчетов, основываясь на исходных данных раздела 4.2.

Оператор $OutAir(Airlist, ggBtAll)$ для каждого рейса из списка $Airlist$ выдаёт планируемые времена начала t_0 и окончания t_k обслуживания ВС на основании заключительного графика состояния ресурсов $ggBtAll$ (листинг П2.7). Результат работы этого оператора для рассматриваемого примера представлен в таблице 4.7.

Оператор $WorkInterval(Reis, List, ggBtAll)$ определяет планируемые времена начала и окончания выполнения работ сетевого графика $List$ по

обслуживанию каждого ВС (*Reis*), на основании заключительного графика состояния ресурсов *ggBtAll* (листинг П2.8).

Таблица 4.7 – *Время начала и окончания обслуживания ВС списка Airlist*

<i>No</i>	1	2	3	4	5	6	7	8
t_0	3	6	10	13	14	21	26	27
t_k	42	50	70	75	80	100	102	140

Пример выдаваемого результата представлен в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – *Время начала и окончания выполнения работ на ВС Reis = 5*

<i>No</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t_0	20	14	49	37	30	42	40	40	60	53
t_k	22	15	51	38	31	44	42	41	66	53
<i>No</i>	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
t_0	40	46	46	46	71	65	66	55	62	50
t_k	42	48	48	48	74	66	67	56	64	51
<i>No</i>	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
t_0	50	69	69	75	73	74	73	73	77	79
t_k	51	71	71	77	74	75	74	74	79	80

Оператор *NetwChartReis(List, WInt)* (листинг П2.9) выдаёт массив планируемых времён наступления событий сетевого графика *List* на основании времени начала и окончания выполнения работ. Пример результата работы оператора представлен в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – *Время наступления событий сетевого графика List для самолёта Reis = 5*

<i>No</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
t_k	14	22	38	51	38	44	66	53	66	73	71	74	75	77	80

Генерация случайных отклонений от нормативных длительностей выполнения работ. Учёт случайных отклонений от нормативных длительностей выполнения работ осуществляется следующим образом.

Во-первых, используется дополнительная информация по каждой работе, а именно, для работы с номером η :

p_η – вероятность того, что будет иметь место отклонение;

N_η – код распределения вероятностей величины отклонения, если $p_\eta > 0$.

Для хранения этой информации используются две дополнительные строки к массиву работ *List*. Они содержатся в отдельном массиве *ListAtt*. Пример приведен в таблице 4.10. Первая его строка указывает номер работы η , вторая – вероятность p_η , третья – код N_η .

Таблица 4.10 – Массив *ListAtt*

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0.10	0	0.12	0	0	0.15	0	0	0	0	0.10	0	0	0.26
-	2	-	3	-	-	7	-	-	-	-	5	-	-	8
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
0	0	0	0.08	0	0	0	0	0.14	0	0	0.11	0	0	0
-	-	-	1	-	-	-	-	4	-	-	6	-	-	-

Расшифровка кодов распределений N_η содержится в массиве *ListDistr*, пример которой представлен в таблице 4.11. Первая строка таблицы содержит номер кода, вторая – наименование распределения, последующие – значения параметров.

Таблица 4.11 – Массив *ListDistr* распределений отклонений

1	2	3	4	5	6	7	8
Равномер.	Экспонен.	Эрланга	Равномер.	Нормал.	Экспонен.	Равномер.	Эрланга
$\alpha = 5$	$\lambda = 0.2$	$\lambda = 0.4$	$\alpha = 0$	$\mu = 10$	$\lambda = 0.15$	$\alpha = 7$	$\lambda = 0.4$
$\beta = 10$	-	$m = 3$	$\beta = 12$	$\sigma = 2$	-	$\beta = 12$	$m = 5$

Во-вторых, саму генерацию случайного отклонения длительности выполнения работы η осуществляет Оператор *StochWork*(η , *List*, *ListAtt*) (листинг П2.10), включаясь в работу, только если $p_\eta > 0$. Вначале генерируется случайная величина R , имеющая равномерное распределение в интервале (0, 1).

Если $R < p_\eta$, то будет иметь место отклонение. Его величина X_1 вырабатывается согласно закону распределения с номером N_η . Она прибавляется к нормативной длительности X_0 из пятой строки массива $List$, и сумма записывается в пятую строку массива $ListStoch$ в качестве фактической длительности выполнения работы (см. формулу (4.4)). Остальные четыре строки массива $ListStoch$ совпадают с аналогичными строками массива $List$.

Теперь в операторе $PerWork(GG, D, Reis, List, i, j, \rho, \tau)$ следует обращаться не к массиву $List$, а к массиву $ListStoch$.

Оператор $StochWork(\eta, List, ListAtt)$ содержит дополнительной *Оператор $StochDurat(\eta, n, ListDistr)$* (листинг П11). Этот оператор генерирует случайное отклонение от нормативной длительности выполнения работы в соответствии с кодом распределения таблицы 4.11.

Вспомогательные операторы. В настоящем разделе будут описаны основные вспомогательные операторы, без чего понять работу всего комплекса расчетов затруднительно.

Операторы расшифровки кодов. Оператор $Filter(\xi)$ проводит расшифровку кода ξ , выдавая список двухзначных чисел. Применительно к массиву данных – это будут номера ВС, находящихся на обслуживании в рассматриваемый момент времени.

Оператор $Filter2(\xi)$ проводит расшифровку кода ξ , выдавая два трёхзначных числа. Применительно к массиву данных – это будут: номер обслуживаемого ВС и соответствующий момент времени.

Оператор $WorkNumCont(M)$ проводит подсчёт числа различных работ в графике состояния бригад M (листинг П12). Оператор используется для проверки того, что учтены все работы.

Валидация имитационного моделирования процесса обслуживания ВС. Подведём итоги рассмотренного примера.

Исходная информация.

- 1) Информация о характеристиках ВС *AirList* – таблица 4.1.

2) Начальный График состояния бригад $ggBt(\rho)$ для каждого вида ресурса ρ – таблица 4.2.

3) Матрица расстояний $D2$ между местами стоянок ВС – таблица 4.3.

4) Матрица типового списка работ $List$ – таблица 4.4.

5) Матрица множительных коэффициентов для различных типов ВС – таблица 4.5.

6) Матрица $ListAtt$, содержащая вероятности отклонений от нормативных длительностей работ и соответствующие им коды распределений – таблица 4.10.

7) Массив $ListDistr$ распределений отклонений – таблица 4.11.

Результаты вычислений.

1) Окончательный график $ggBt(\rho)$ состояния бригад каждого типа ρ , а также всех бригад в совокупности $ggBtAll$.

2) Планируемые времена начала и окончания обслуживания ВС $OutAir$ списка $AirList$ – таблица 4.7.

3) Планируемые времена начала и окончания работ $WorkInterval$ по обслуживанию каждого ВС (рейса) $Reis$ – таблица 4.8.

4) Массив $NetwChartReis$ планируемых времён наступления событий сетевого графика $List$ – таблица 4.9.

Анализ полученных результатов показывает, что автоматизированные расчеты осуществляются правильно.

4.6. Методика применения имитационной модели ресурсно-временной оптимизации процессов оперативного управления работой бригад по наземному обслуживанию воздушных судов

Назначение методики. Методика предназначена для ресурсно-временной оптимизации процессов оперативного управления работой бригад по наземному обслуживанию ВС в штатной и сбойной ситуациях, базирующейся на имитационной модели. Листинги программ (операторов)

модели в комплексе с НСИ оформлены в виде модуля («Имитация») и поставляются заказчику при внедрении модуля.

Области применения методики. Модуль «Имитация» может использоваться как автономно в штатной ситуации, так и в комплексе с модулями «СПП-ССЭ» или «СПП-ССО» в сбойной ситуации аэропорта.

Модуль «Имитация» также может использоваться для проверки адекватности аналитической модели (разделы 2.7, 3.4 и 3.6) при заданных критериях эффективности и начальных условиях для конкретного аэропорта.

В первом случае очередность отправлений ВС задается управляющим органом главного оператора.

Во втором случае модуль «Имитация» применяется, если главным оператором аэропорта внедрены подсистема «СПП» с соответствующими модулями «СПП-ССЭ» или «СПП-ССО». Заметим, что модуль «СПП-ССЭ» входит как стандартный модуль в состав подсистемы «СПП», а модули «СПП-ССО» и «УР-ССО» входят также в состав соответствующих подсистем, но выбираются заказчиком и поставляются дополнительно.

Если внедрена только подсистема «СПП» со стандартным модулем «СПП-ССЭ», то устанавливается очередность вылета ВС на основе применения эвристического алгоритма (шаблона).

Если внедрена подсистема «СПП» со дополнительным модулем «СПП-ССО», то главный оператор может устанавливать очередность вылета ВС, выполняющих пассажирские рейсы, по своему усмотрению на основе применения эвристического алгоритма или оптимизационной модели. Заметим, что подсистема «СПП» является первоочередной подсистемой для внедрения в составе АС «КОБРА-2».

Нормативно-справочная информация для применения модуля «Имитация». Для применения внедренного модуля необходимо сформировать файл со следующей нормативно-справочной информацией, характерной для конкретного аэропорта:

- набор критериев при постановке оптимизационных задач оптимизации;
- текущий суточный план полетов;
- текущие технологические графики обслуживания ВС;
- типы принимаемых ВС;
- состав располагаемых статических и динамических ресурсов аэропорта в штатной ситуации;
- расположение мест стоянок ВС и матрица расстояний между ними.

Формирование исходных и производных данных для выполнения оптимизационных расчетов с применением модуля «Имитация».

Исходные данные:

- 1) Информация о характеристиках ВС *AirList*.
- 2) Начальный график состояния бригад $ggBt(\rho)$ для каждого вида ресурса.
- 3) Матрица расстояний $D2$ между местами стоянок ВС3.
- 4) Матрица типового списка работ *List*.
- 5) Матрица множительных коэффициентов для различных типов.
- 6) Матрица *ListAtt*, содержащая вероятности отклонений от нормативных длительностей работ и соответствующие им коды распределений.
- 7) Файл *ListDistr* распределений отклонений.
- 8) Подсчет (при необходимости) числа всех перестановок, рассматриваемых в описанной процедуре последовательного поиска с горизонтом просмотра (*оператор Permut(n)*).

Процедуры и операторы (программы) формирования производных исходных данных:

- 1) Формирование файла *Airlist* с данными об очередности обслуживания ВС (обозначенной порядковыми номерами ВС), типах ВС и местах их стоянки.
- 2) Формирование файлов *R1* и *R2* с информацией о располагаемых ресурсах и их объемах соответственно.

- 3) Формирование файла Se с данными об используемых ресурсах (об обслуживании).
- 4) Формирование графика работы бригад в виде файла ggB (*оператор* $ggB(i)$).
- 5) Дополнение файла ggB пустыми строками для получения файла GG по всем ВС для последующего применения (*оператор* $ggFB(i)$).
- 6) Объединение информации для всех видов ресурса ρ в один массив $ggBtAll$, в котором представлены все бригады, в порядке номеров их профилей ρ (*оператор* $TotalggB$).
- 7) Формирование файла GG (*оператор* $Introd(R)$).
- 8) Корректировка состояния бригады с номером $NBrig$ в массиве состояния бригад GG путём замены строки с номером $NBrig$ массива GG на строку Rez (*оператор* $CorrStBr(GG, NBrig, Rez)$).
- 9) Формирование квадратной матрицы расстояний порядка L из нулей (*оператор* $Dist0(L)$).
- 10) Ввод в матрицу D расстояний d между местами η и η' возможного местонахождения бригад (*оператор* $Dist(\eta, \eta', d)$).
- 11) Выдача списка работ (i, j) , завершающихся событием j (*оператор* $PrecW(j, List)$).
- 12) Выделение подмассива, относящегося к бригадам ρ -го вида из общего файла GGG (*оператор* $ggB\rho(\rho, GGG)$).
- 13) Ввод в общий файл состояния бригад GGG массива $ggBNew$, содержащего данные о бригадах ρ -го ресурса (*оператор* $ggB\rho In(\rho, GGG, ggBNew)$).
- 14) Определение периода обслуживания i -го вида для BC_j для w -ой бригады на основании текущей информации графика обслуживания GG с выдачей строк, элементами которых являются 0, -1 и номер BC_j (*оператор* $gtB(GG, j, i, w, \tau)$).
- 15) Формирование файла $GtbAl$ по периодам обслуживания i -го вида BC_j для всех бригад (*оператор* $gtAllB(GG, i, \tau)$).

16) Вычисление вектора расстояний, покрываемых каждой бригадой, проводящей данный вид обслуживания, и суммы этих расстояний (*оператор CriteriaB(GtbAll)*).

17) Выдача для каждого ВС из графика GG трех значений: номер ВС, проходящего данный вид обслуживания i , начало и окончание обслуживания (*оператор ListAir(GG, ggBt, i)*).

18) Планирование выполнения работы (i, j) после времени τ из списка работ $List$, провозимых на рейсе $Reis$ (*оператор PerWork(GG, D, Reis, List, i, j, \rho, \tau)*).

19) Ввод в массив GG вместо старой строки обновлённую строку Rez (*оператор CorrStBr(GG, NBrig, Rez)*).

20) Составление сетевого графика всех видов обслуживания для ВС $Reis$ с формированием файла $ggBtAllNew$, содержащего информацию о текущем состоянии каждой из бригад ρ , а также всех бригад в совокупности (*оператор PerNetCh(Reis, D, ggBtAll, List, \tau)*).

21) Определение потребного ресурса ρ для конкретной работы (*оператор ggBp(\rho, ggBtAll)*).

22) Выдача обновлённого состояния бригад данного ресурса $ggBNew$ (*оператор PerWork(GG, D, Reis, List, i, j, \rho)*).

23) Ввод ресурса $ggBNew$ в файл $ggBtAllNew$, который является выходным (*оператор ggBpIn(\rho, ggBtAllNew, ggBNew)*).

24) Составление сетевого график всех видов обслуживания для всех ВС списка $Airlist$ (*оператор PerAll(Airlist, D, ggBtAll, List, \tau)*), путем многократного обращения к *оператору PerNetCh(Reis, D, ggBtAll, List, \tau)*.

25) Формирование результирующего файла состояний всех бригад $ggBtAll$, являющегося основой информационного обеспечения для результирующих расчетов (*оператор PerAll(Airlist, D, ggBtAll, List, \tau)*).

Результирующие оптимизационные расчеты с применением модуля «Имитация».

1) Реализации алгоритма последовательного поиска с горизонтом просмотра для заданного критерия эффективности с выдачей графика состояния ресурсов $graphic(оператор SeqAlg(AllAirc, h, T, \tau, \lambda))$.

2) Расчет планируемых времен начала t_0 и окончания t_k обслуживания ВС для каждого рейса из списка *Airlist* на основании заключительного графика состояния ресурсов $ggBtAll$ (оператор $OutAir(Airlist, ggBtAll)$).

3) Расчет планируемых времен начала и окончания выполнения работ сетевого графика *List* по обслуживанию каждого ВС (*Reis*) на основании заключительного графика состояния ресурсов $ggBtAll$ (оператор $WorkInterval(Reis, List, ggBtAll)$).

4) Выдача массива планируемых времён наступления событий сетевого графика *List* на основании времени начала и окончания выполнения работ (оператор $NetwChartReis(List, WInt)$).

5) Печать списка номеров ВС, обслуживаемых каждой бригадой, на основе входной информации файла *GtbAl* (оператор $TabASB(GtbAll)$).

Выводы по главе 4

1. Разработана новая имитационная модель процесса создания и ведения сетевого графика обслуживания ВС перед вылетом, которые могут применяться для целей текущего или оперативного управления работой бригад по обслуживанию ВС как в штатных, так и в сбойных ситуациях аэропорта. Модель учитывает не только технологическую последовательность выполнения работ, но и наличие необходимых ресурсов (бригад, средств механизации, мест стоянки ВС на перроне и пр.). Структура модели позволяет вводить в неё различные модификации, используя возможности компьютерной вычислительной среды Mathcad.

2. Разработан инструментарий имитационного моделирования процесса подготовки ВС к вылету, обеспечивающий автоматизацию процедуры составления графиков обслуживания всех ВС в порядке, предусмотренном очередностью подготовки ВС к отправлению, заданной текущим или скорректированным СПП.

3. Применительно к разработанной модели адаптированы и апробированы методы имитации случайных факторов, сопровождающих процесс ТО ВС: отклонения от плановых продолжительностей выполнения работ, обнаружение неисправностей авиатехники и пр.

5. Представленный сквозной валидационный пример иллюстрирует основные составляющие разработанной имитационной модели.

6) Разработана методика применения имитационной модели для ресурсно-временной оптимизации работы бригад по НО ВС в штатной и сбойной ситуации аэропорта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основании выполненных автором исследований разработаны методы ресурсно-временной оптимизации процесса ОУ в ССА, базирующиеся на аналитических и имитационной моделях, и модулях автоматизации соответствующих расчетов. В процессе исследований получены следующие результаты:

1. На основе анализа действующей российской нормативной базы данных федеральной статистической отчетности по регулярности отправления ВС (форма 30 ГА) и анкетного обследования IT-руководителей аэропортов:

- выявлены наиболее значимые нарушения, влияющие на возникновение сбойных ситуаций по вине служб аэропорта, авиаперевозчиков и других факторов;

- определены тренды различных статистических показателей регулярности отправления ВС в зависимости от метеоусловий в целом по аэропортам ГА и по типичным аэропортам различных классов, и выявлена необходимость совершенствования федеральной формы 30 ГА, не удовлетворяющей современным условиям;

- выявлено состояние и приоритеты автоматизации процессов ОУ аэропортом.

2. Разработаны новые аналитические методы ресурсно-временной оптимизации процессов ОУ очередностью отправления ВС и работы бригад по НО ВС в ССА, базирующиеся на постановке, выборе метода и автоматизации решения поставленных задач, отличающиеся от известных тем, что:

- задачи сформулированы математически строго, как задача теории расписания.

- выбран и адаптирован метод последовательного поиска с горизонтом просмотра, наиболее подходящий для решения поставленной задачи.

- задачи являются инвариантными к критериям эффективности очередности подготовки ВС к отправлениям.

- в задачах учтено местоположение ВС на перроне аэропорта, что позволяет минимизировать сумму расстояний, покрываемых бригадами по НО при перемещениях.

- в задачах учтена динамика наличия располагаемых ресурсов и их состояния, изменяющегося во времени суток.

3. На базе выполненных исследований разработаны и внедрены в аэропортах «Абакан» и «Сургут» информационное обеспечение и модули автоматизации ресурсно-временной оптимизации процессов оперативного управления «СПП-ССО» и «УР-ССО» в составе подсистем АС «КОБРА-2».

4. Впервые разработана имитационная модель ресурсно-временной оптимизации процесса ОУ работой бригад по НО ВС в аэропорту, учитывающая не только технологическую последовательность выполнения работ, но и наличие необходимых ресурсов (бригад, средств механизации, мест стоянки ВС на перроне и пр.). Имитационная модель может применяться как самостоятельно в штатных и сбойных ситуациях аэропорта, так и в комплексе с модулями «СПП-ССЭ» «СПП-ССО» в ССА. Технология имитационного моделирования реализована в модуле «Имитация», который может внедряться как в составе АС «КОБРА-2», так и самостоятельно. Разработана методика применения модуля «Имитация».

5. Научно-практическая значимость диссертационного исследования подтверждена свидетельствами Роспатента на программы ЭВМ, актами внедрения и рецензируемое учебное пособие с грифом УМО.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ERP – Enterprise Resource Planning

IATA – International Air Transport Association

ICAO – International Civil Aviation Organization

KPI – key performance indicators

АРМ – автоматизированное рабочее место

АС – автоматизированная система

АП – аэропорт

ВПП – взлетно-посадочная полоса

ВС – воздушное судно

ВТ – воздушный транспорт

ГА – гражданская авиация

ГСМ – горюче-смазочные материалы

ИО – информационное обеспечение

ИС – информационная система

ИУС – информационно-управляющей системы

НО – наземное обслуживание

НПП – наставление по производству полетов

НСИ – нормативно-справочная информация

ОУ – оперативное управление

ОУПД – оперативное управление производственной деятельностью

ПДС – производственно-диспетчерская служба

РДС – расписание движения самолетов

ССА – сбойная ситуация аэропорта

СПП – суточный план полетов

ТГНО – технологический график наземного обслуживания

ТО – технологическое обслуживание

ТУГА – территориальных управлений гражданской авиации

УМО – учебно-методическое объединение

ЦНИИАСУГА – центральный научно-исследовательский институт
автоматизированных систем управления гражданской авиации

ЦОД – центр обработки данных

ЦРДС – центральное расписание движения самолетов

ЭС – экспортная система

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конвенция для унификации некоторых правил, касающихся международных воздушных перевозок (Варшавская конвенция 1929 г.) с изменениями и дополнениями, внесенными Протоколом от 28 сентября 1955 г. с учетом принятых позднее Гаагского 1955 г. и Монреальского 1975 г. протоколов.
2. Руководство по аэропортовому обслуживанию (Airport Handling Manual), IATA, 25th edition, January 2005.
3. Руководство по экономике аэропортов. Международная организация гражданской авиации. Документ ИК. Издание 3. 2013. Электронный ресурс: http://www.icao.int/publications/Documents/9562_ru.pdf.
4. Воздушный кодекс Российской Федерации от 19.03.1997 №60-ФЗ (принят ГД ФС РФ 19.02.1997).
5. Гражданский кодекс РФ (части первая и вторая). Принят Государственной Думой 21 октября 1994 г.
6. Правила обеспечения доступа к услугам субъектов естественных монополий в аэропортах. Утверждены Постановлением Правительства Российской Федерации от 22 июля 2009 г. N 599.
7. Постановление Госкомстата России от 4.09.2000г. № 77 «Об утверждении статистического инструментария для организации Минтрансом России статистического наблюдения за деятельностью предприятий воздушного транспорта».
8. Федеральные авиационные правила "Требования к операторам аэродромов гражданской авиации. Форма и порядок выдачи документа, подтверждающего соответствие операторов аэродромов гражданской авиации требованиям федеральных авиационных правил». Приказ Министерства транспорта РФ от 25 сентября 2015 г. N 286.

9. Федеральные авиационные правила. Сертификация аэропортов. Утверждены и введены в действие Приказом ФСБТ России от 24 апреля 2000 г. N 98. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_125345/?frame=1#p137.
10. Федеральные авиационные правила «Общие правила воздушных перевозок пассажиров, багажа, грузов и требования по обслуживанию пассажиров, грузоотправителей, грузополучателей». Приказ N 82 от 28 июня 2007 г.
11. Методика расчета технической возможности аэропортов и порядка применения методики расчета технической возможности аэропортов. Утвержд. приказом Минтранса РФ от 24.02.2011 № 63.
12. Наставление по производству полетов НПП ГА-85. Электронный ресурс: http://www.tosnoaero.ru/library/documents/appendix/NPP_GA-85.pdf.
13. Порядок формирования, утверждения и опубликования расписания регулярных воздушных перевозок пассажиров и (или) грузов, выполняемых перевозчиками, имеющими соответствующие лицензии. Утвержден приказом Минтранса РФ от 12.11.2011 № 310.
14. Руководство по обеспечению и учету регулярности полетов воздушных судов гражданской авиации СССР (РРП ГА-90), утверждено Приказом МГА СССР от 10.01.1990 № 6. Электронный ресурс. – Режим доступа: www.gsga.ru/favt_new/sites/default/files/20130410-rrp.rtf.
15. Руководство по эксплуатации гражданских аэродромов РФ. Утв. директором ДВТ от 19.09.94., №ДВ-98.
16. Акоф, Р. Основы исследования операций. Перевод с английского / Р. Акоф, М. Сасиени. – М.: Мир, 1971. – 534 с.
17. Андронов, А.М. Математические методы планирования и управления производственно-хозяйственной деятельностью предприятий гражданской авиации / А.М. Андронов, А.Н. Хижняк. – М.: Транспорт, 1977. – 215с.

18. Андрианов, В.В. Организация, планирование и управление производством гражданской авиации. Часть 1. Учебное пособие / В.В. Андрианов. – М.: МГТУ ГА, 1994. – 92 с.
19. Бурдюк, В.Я. Теория расписаний. Задачи и методы решений / В.Я. Бурдюк, В.В. Шкурба. – Кибернетика, 1971.– № 1, - 224 с.
20. Басакер, Р. Конечные графы и сети / Р. Басакер, Т. Саати. – М.: Наука, 1974, - 368 с.
21. Бусленко, Н.П. Моделирование сложных систем / Н.П. Бусленко. - М.: Наука, 1968. – 356с.
22. Вадзинский, Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям / Р.Н. Вадзинский. - М.: Наука, 2001, - 295 с.
23. Васильев, В.И. Моделирование систем гражданской авиации / В.И. Васильев, А.И. Иванюк, В.А. Свириденко. - М.: Транспорт, 1988. – 312 с.
24. Веневцев, В.М. Эвристический метод составления пассажирского расписания движения самолетов с помощью ЭВМ / В.М. Веневцев, И.Б. Герцбах, Х.Б. Кордонский, В.К. Линис, М.С. Максим. – М.: Наука, 1969,
25. Вентцель, Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. / Учебное пособие. М.: «Академия», 2003. – 432 с.
26. Волкова, Л.П. Взаимодействие аэропорта и авиакомпаний при наземном обслуживании воздушных перевозок. Научный Вестник № 41. - МГТУ ГА, 2001.
27. Головченко, Г.В., Смуров, М.Ю., Сухих, Н.Н. Автоматизация информативно-управляющих процессов в организационно-экономической системе авиапредприятия с помощью активной ПУС. // Транспорт РФ. 2014. – № 6 (55). – с. 35–38.
28. Головченко, Г.В. К задаче оптимизации оперативного управления самолетовылетами при сбойных ситуациях в аэропорту // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – Санкт-Петербург. 2016, № 1 (10), с. 29-37.

29. Головченко, Г.В. Метод оптимизации очередности подготовки самолетов к вылету при сбойных ситуациях // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации, 2016, № 2 (11), с. 29-37.
30. Головченко, Г.В., Костин, А.А. Статистический анализ показателей регулярности отправок воздушных судов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации, 2016, № 4. (13), с.137-146.
31. Головченко, Г.В., Ребезова, М.И. Метод расчета сетевых графиков выполнения работ, учитывающий наличие располагаемых ресурсов. Научный Вестник МГТУГА, том 19, №5, 2016, с. 40-48.
32. Головченко, Г.В. и др. «КОБРА-2». Автоматизированная система комплексного обслуживания рейсов в аэропорту. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010613225 // Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ Роспатента от 14.05.2010 г.
33. Головченко, Г.В., Романов, А.Н. «Электронный диктор». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616682 // Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ Роспатента от 26.08.2011 г.
34. Головченко, Г.В. и др. «Визинформ-3». Автоматизированная система визуального информирования пассажиров. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013618385 // Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ Роспатента от 06.09.2013 г.
35. Головченко Г.В. и др. Система регистрации пассажиров и багажа (КОБРА DCS). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016613266 // Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ Роспатента от 28.01.2016 г.
36. Головченко, Г.В. Повышение производственно-экономических показателей авиапредприятий за счет внедрения современных ИТ-решений// Материалы Международной научно-практической конференции «Транспорт России: проблемы и перспективы». СПб.: ИПТ РАН. 2017. 197-200 с, ISBN 978-5-9908209-6-8.

37. Головченко Г.В., Губенко А.В., Махарев Э.И., Смуров М.Ю. Автоматизация производственной и финансово-экономической деятельности предприятий гражданской авиации / Допущено УМО по образованию в области аэронавигации /– М.: ТИД «Студент». – 2016. – 349 с.
38. Головченко Г.В. Организация процессов совместного принятия решений на базе АС «КОБРА». М.: Аэропорт Партнер. Журнал Ассоциации «Аэропорт» ГА стран СНГ №1 (109), 2016, с. 9-10.
39. Головченко Г.В. Автоматизация аэропортов, проектирование эффективных IT-решений. М.: Аэропорт Партнер. Журнал Ассоциации «Аэропорт» ГА стран СНГ №2 (117), 2017, с. 21-23.
40. Головченко, Г.В. Основные тренды развития IT в аэропортах РФ. М.: Аэропорт Партнер. Журнал Ассоциации «Аэропорт» ГА стран СНГ №1 (120), 2018, с. 15-16.
41. Головченко, Г.В. Комплексная автоматизация деятельности аэропорта. Авиационный IT-2015. 8-я ежегодная международная конференция. Электронный ресурс: <https://events.ato.ru/events/2481/detail/>.
42. Головченко, Г.В. Текущая ситуация и перспективы развития IT в отечественной авиации. IT-форум «Наземное обслуживание в аэропортах-2017». 8-я международная выставка и конференция. М.: АТО, 26-27 сентября 2017. Электронный ресурс: <https://events.ato.ru/events/11096/detail/>.
43. Головченко, Г.В. Исследование IT-оснащенности российских аэропортов. АТО Events. Shaping the future of the air transport industry (DASR 2018). 11 апреля 2018. Электронный ресурс. – Режим доступа: <https://events.ato.ru/events/14398/detail/>.
44. Голубев, И.С. Исследование операций в гражданской авиации / И.С. Голубев, Р.В. Сакач, Е.Л. Логинов, Е.Г. Пинаев. – М.: Транспорт, 1980. – 256с.
45. Додонов К.Н., Чинючин Ю.М. Разработка общей схемы алгоритма имитационного моделирования процесса наземного обслуживания воздушных судов. Электронный ресурс. – Режим доступа: ifmstuca.ru/site/images/Doc.../confer/.../Dodonov.pdf.

46. Дьяконов В. Mathcad 2001. Учебный курс. Санкт-Петербург – Москва – Харьков – Минск: Питер, 2001.
47. Емеличев, В.А. Лекции по теории графов / В.А. Емеличев, О.И. Мельников, В.И. Сарванов, Р.И. Вышкевич. – М.: «Наука». Физматгиз, 1990.
48. Ермольев, Ю.М. Методы стохастического программирования / Ю.М. Ермольев. –М.: Наука. – 1976.
49. Зайченко, Ю.П. Исследование операций / Ю.П. Зайченко. –Киев: Выща школа, 1988. – 552 с.
50. Конвей, Р.В. Теория расписаний / Р.В. Конвей, В.Л. Максвелл, Л.В. Миллер. – М.: «Наука». Гл. редакция физико-математической литературы. – 1975. – 360 с.
51. Коникова, Е.В. Диссертация на тему «Совершенствование методов принятия решений в интерактивном режиме диспетчером системы комплексного оперативного управления наземным обслуживанием воздушных судов». [Электронный ресурс].– Режим доступа: [http://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-metodov-prinyatiya-reshenii-v-interaktivnom-rezhime-dispetcherom-sistemy-#ixzz4Xc6DgCIJ](http://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-metodov-prinyatiya-reshenii-v-interaktivnom-rezhime-dispetcherom-sistemy-kompleksnogo-operativnogo-upravleniya-nazemnym-obsluzhivaniem-vozdushnykh-sudov).
52. Коникова, Е.В. Имитационное моделирование процессов эксплуатации спецтранспорта при наземном обслуживании воздушных судов на перроне // Вестник МАДИ (ГТУ). 2007. – №4 (11) – с. 98-104.
53. Коникова, Е.В., Система управления наземным обеспечением авиаперевозок в условиях риска / Е.В. Коникова, А.А. Коромыслов. Журнал: Логистика сегодня, 2009. – №1 – С. 17-22.
54. Коникова, Е.В. Решение задач оперативного планирования и управления наземным обеспечением полетов на основе имитационной модели. // Межвузовский тематический сборник научных трудов. Академия ГА. Том IX. Ч. 1. 2004. – С. 38-41.
55. Коникова, Е.В. Имитация процессов наземного обслуживания воздушных судов в аэропортах на ЭВМ // Межвузовский тематический сборник научных трудов. Академия ГА. IX. Ч 1. 2004. – С. 48-54.

56. Корбут, А.А. Дискретное программирование / А.А. Корбут, Ю.Ю. Финкельштейн. – М.: «Наука». Главная редакция физико-математической литературы. 1969, - 368 с.
57. Кордонский, Х.Б. Эвристический метод составления авиационного расписания. Сб. АН СССР «Автоматизация в машиностроении». – 1969.
58. Кордонский Х.Б., Веневцев В.М. и др. Центральное расписание движения самолетов, как часть управления воздушным движением // Труды 1-го Международного симпозиума по управлению движением. – Версаль, 1970 г.
59. Кофман, А. Сетевые методы планирования и их применение / Кофман А., Г. Дебазей. – М.: Прогресс, 1969, - 182 с.
60. Кристофидес, Н. Теория графов. Алгоритмический подход / Н. Кристофидес. – М. – Мир, 1978, - 432 с.
61. Крыжановский, Г.А. Управление транспортными системами / Г.А. Крыжановский, В.В. Шашкин. -СПб.: Международная Академия транспорта, 1998. – 163с.
62. Крыжановский, Г.А. Управление транспортными системами. Часть 2 / Г.А. Крыжановский, В.В. Шашкин. -СПб.: СПГУВК, 1999. – 271с.
63. Крыжановский, Г.А. Управление транспортными системами. Часть 3 / Г.А. Крыжановский, В.В. Шашкин. – С.-Пб.: «Северная звезда», Издательство Санкт-Петербургского общественного «Фонда культуры и образования», 2001. – 224с.
64. Курейчик, В.М. Генетические алгоритмы и их применение. Монография / В.М. Курейчик. -Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2002.
65. Липский, В. Комбинаторика для программистов / В. Липский. – М.: Мир, 1988, - 200 с.
66. Лившиц, В.Н. Оптимизация планирования и управления транспортными системами / В.Н. Лившиц, Е.М. Васильева, Р.В. Игудин. – М.: Транспорт. 1987. – 208с.
67. Максвелл, В.Л. Теория расписаний / В.Л. Максвелл, Л.В. Миллер. М.: Наука, 1973, - 360 с.

68. Малышева, Т.А. Основные понятия, применяемые при оценке задержек авиационных рейсов, и классификация задержек. Научный вестник МГТУ ГА. № 99. М.: МГТУ ГА, 2006. – с. 137-140.
69. Малышева, Т.А. К разработке метода анализа задержек рейсов в авиационных предприятиях. Научный вестник МГТУГА. №100, 2006. – с. 175-177.
70. Малышева, Т.А. Оценка регулярности полетов воздушных судов, выполняемых авиакомпаниями РФ. Научный вестник МГТУ ГА. № 100, 2006. – с. 178-181.
71. Малышева, Т.А. Анализ распределения задержек рейсов в авиапредприятиях элиминированием по интервалам времени суток, продолжительности и кодам. Научный вестник МГТУ ГА. № 109, 2006. – с. 144-147.
72. Махарев, Э.И. и др. Расписание, тарифы и сборы в Системе взаиморасчетов на воздушном транспорте. Под ред. Э.И. Махарева, Ю.В. Нестерова. М.: ТИД «Студент». – 2015. – 512 с.
73. Методическое пособие по статистике воздушного транспорта. М.: ТКП. 2008, Электронный ресурс:
http://budgetrf.ru/stat/Methodology/gks_method01_/gks_method01_1060.htm.
74. Михайлов Г.А. Численное статистическое моделирование. Методы Монте-Карло / Г.А. Михайлов, А.В. Войтишек. М.: Издательский центр «Академия», 2006, - 370 с.
75. Михалевич, В.С. Последовательные схемы оптимизации в задачах упорядочения выполнения работ / В.С. Михалевич, В.В. Шкурба -Кибернетика, 2, 1966. С. 43-40.
76. Оре, Р. Теория графов. М.: Мир, 1968, - 352 с.
77. Продукты Mathcad. Электронный ресурс. – Режим доступа: <http://pts-russia.com/products/mathcad/mathcad-info.html>.
78. Романенко, В.А. Имитационная модель технологических процессов наземного обслуживания перевозок в аэропорту. Известия высших учебных

заведений. Поволжский регион. Технические науки. Выпуск № 1 (17). – 2011. – 79-95.

79. Рыбников, К.А. Введение в комбинаторный анализ. – М.: Издательство МГУ, 1972, - 256 с.

80. Саати, Т. Аналитическое планирование. Организация систем / Т. Саати, К. Керне. – М.: изд-во «Радио и связь», 1991, - 224 с.

81. Свами, М. Графы, сети, алгоритмы / М. Свами, К. Тхуласираман -М.: Наука, 1984, - 450 с.

82. Староселец, В.Г. Основы теории управления транспортными системами. – СПб.:СПбГУГА. 2008. 218с.

83. Танаев, В.С. Введение в теорию расписаний. Под ред. Д.Б. Юдина. В.С. Танаев, В.В. Шкурба. – М.: Наука. – 1975. – 256 с.

84. Таха, Х.А. Введение в исследование операций. – М.: Мир. 1985, - 912 с.

85. Теория расписаний и вычислительные машины. Под редакцией Э.Г. Коффмана. М.: «НАУКА», 1984. – 335 с. (пер. с англ. Coffman E.G., Bruno J.L., Graham R.I., Kohler W.H., Sethi R., Steglite K., Ulman J.D. Computer and Job-Shop Scheduling Theory. Jon Willey&Sons, Inc. 1976).

86. Чинючин, Ю. М. Построение имитационной модели процесса оперативного обслуживания воздушных судов в штатной ситуации. Научный вестник МГТУГА. 2012 – № 17.

87. Чинючин, Ю. М.. Построение имитационной модели процесса оперативного обслуживания воздушных судов в нештатной и сбойной ситуациях. Научный вестник МГТУГА. 2013 – Выпуск № 7 (193).

88. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем- искусство и наука. Пер. с англ. – М., «Мир», 1978. – 418с.

89. Шкурба, В.В. Введение в теорию расписаний. Задача трех станков. – М.: «НАУКА», 1970 – 96 с.

90. Юдин, Д.Б. Стохастическое программирование. – М.: Наука, 1981, - 392 с.

91. Яшкин, А.Р. Организация управления наземными службами аэропортов. Теоретические основы оптимизации функционирования. Учебное пособие / А.Р. Яшкин, А.Л. Павлов. -СПб.: ОЛАГА, 1983 – 75с.
92. Alexis, L. Enterprise Resource Planning.- 2nd - New Dehli: McGraw-Hill, 2008, - 500 с.
93. Andronov, A.M. Polynomial approximation of the activity time distribution in network diagrams. Automatic control and computer sciences / A.M. Andronov, M.I. Rebezova. –Vol. 47, N4, 2013. – P. 192-201.
94. Andreescu T., Feng Z. A Path to Combinatorics for Undergraduates. Counting Strategies. Boston-Basel-Berlin: Birkhäuser, 1956.
95. Bellman, R. Mathematical aspects of scheduling theory // Journal of the Society of Industrial and Applied Mathematics. – Vol. 4. – 1956.
96. Brualdi, R.A. Introductory combinatorics. Third edition. Upper Saddle River. New Jersey: Prentice Hall, 1999.
97. Davis, I. (ed.) Handbook of Genetic Algorithms. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.
98. Gertsbakh, I. Probabilistic Ideas in Heuristic Algorithms for Solving Scheduling Problems, Nav. Res. Log. Quarterly, 1977, Issue 2, pp 339-348.
99. Gertsbakh, I. Minimal Resources for Fixed and Variable Job Schedules. Operations Research. – 1978, No 1. – 68-75.
100. Gertsbakh, I. Constructing an Optimal Fleet for a Transportation Schedule, Transportation Science. – 1977, 11(1). – 20-36.
101. Gertsbakh, I. Periodic Transportation Schedule with Flexible Departure Times an Interactive Approach Based on Periodic Event Scheduling problems and the Deficit Function Approach. Europ. J. Operations Research. – 1991, 50(3). – 298-309.
102. Goldberg, D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Reading: Addison-Wesley. – 1989.
103. Jackson, J.R. An extension of Johnson’s results on job lot scheduling. Nav. Res. Log. Quart., 3, N 3, 1956. Pp. 201-203.

104. Johnson, S.M. Optimal two-and three stage production schedules with set-up times included. *Nav. Res. Log. Quart.*, 1, N 1, 1954. Pp. 61-68.
105. Johnson, S.M. Discussion: sequencing n-jobs on two machines with arbitrary time lags. *Manag. Sci.*, 5, N 3, 1959. Pp. 299-33.
106. Hu, T.C. *Integer programming and Network Flows*. Menlo Park, California – London: Addison-Wesley, 1970.
107. Little J.D.C., Murty K.G., Sweeney D.W., and Karel C. An algorithm for the traveling salesman problem. *Operations Research*. v11 (1963), pp 972-989.
108. *Practical Handbook of Genetic Algorithms*. Editor I. Chambers. V.1, Washington, US A, CRC Press, 1995.
109. *Practical Handbook of Genetic Algorithms*. Editor I. Chambers. V.2, Washington, US A, CRC Press, 1995.
110. *Practical Handbook of Genetic Algorithms*. Editor I. Chambers. V.3, Washington, US A, CRC Press, 1999.
111. Reeves, C.R. *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1993.
112. Ross, Sh. M. *Simulation*. Fourth Edition. Amsterdam: Elsevier, 2006.
113. Sleeper, A. *Six Sigma Distribution Modeling*. New York: McGraw-Hill, 2006.
114. Smith R.D., Dudek R.A. A general algorithm for solution of the n-job, m-machine sequencing problem of the flow shop. *Operat. Res.*, 15, N 1, 1967. Pp. 71 – 82.
115. Venevcev V., Gertsbakh I., Linis V., Maksim M., Kordonsky Kh., Central Avia-schedule as a Part of Air Traffic Control System. *Proceedings of the First International Traffic Control Session, Sec. 6, 5-26 (Versailles, 1970)*.
116. Сайт РИВЦ-Пулково. Электронный ресурс. – Режим доступа: www.rivc-pulkovo.ru/produkts/kobra.
117. Сайт ТАИС. Электронный ресурс. – Режим доступа: www.tais.ru/solution/icarus/regina/index.php.
118. Сайт ИАТ ВТ. Электронный ресурс. – Режим доступа: www.iatvt.ru.

119. Сайт ЗАО «Сирена-Трэвел». Электронный ресурс. – Режим доступа: www.syrena-travel.ru/#aeroportam.

120. Сайт CollaborativeDecisionMaking. Электронный ресурс. – Режим доступа: <http://www.eurocontrol.int/articles/airport-collaborative-decision-making-cdm>.

121. Сайт ООО «Фирма НИТА». Электронный ресурс. – Режим доступа: www.nita.ru/catalog/kompleks-obespechenija-poletov-brifing/.

122. Электронный ресурс. – Режим доступа: http://www.academia.edu/5330029/%D0%93%D0%9B%D0%90%D0%92%D0%9D%D0%AB%D0%95_%D0%A8%D0%9F%D0%9E%D0%A0%D0%AB_%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%9E%D0%92.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Листинги основных операторов имитационной модели

1. Листинг оператора $Permut(n)$

```

Permut (n) :=
  R ←  $\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$  if n = 2
  otherwise
    P ← Permut (n - 1)
    M ← (n - 1)!
    j ← 0
    for ρ ∈ 1 .. M
      V ← P⟨ρ⟩
      for i ∈ 1 .. n
        j ← j + 1
        for k ∈ 1 .. n
          Rk,j ← if(k < i, Vk, if(k = i, n
R

```

2. Листинг оператора $PrecW(j, List)$

```

PrecWor (j, List) :=
  Rez ← (0 0 0 0)T
  num ← 0
  for η ∈ 1 .. cols (List)
    if List2,η = j
      num ← num + 1
      Reznum ← η
  RezT

```

3. Листинг оператора $ggB\rho(\rho, GGG)$

$$ggB \rho(\rho, GGG) := \left| \begin{array}{l} n \leftarrow 1 \text{ if } \rho = 1 \\ n \leftarrow \sum_{i=1}^{\rho-1} NB(i) + 1 \text{ otherwise} \\ \text{number} \leftarrow NB(\rho) \\ GGV \leftarrow GGG^T \\ \text{for } br \in 1.. \text{number} \\ \left| \begin{array}{l} Rez^{\langle br \rangle} \leftarrow GGV^{\langle n \rangle} \\ n \leftarrow n + 1 \end{array} \right. \\ Rez^T \end{array} \right.$$

4. Листинг оператора $ggB\rho In(\rho, GGG, ggBNew)$

$$ggB \rho In(\rho, GGG, ggBNew) := \left| \begin{array}{l} GGV \leftarrow GGG^T \\ n \leftarrow 1 \text{ if } \rho = 1 \\ n \leftarrow 1 + \sum_{i=1}^{\rho-1} NB(i) \text{ otherwise} \\ \text{number} \leftarrow NB(\rho) \\ \text{for } br \in 1.. \text{number} \\ \left| \begin{array}{l} GGV^{\langle n \rangle} \leftarrow (ggBNew^T)^{\langle br \rangle} \\ n \leftarrow n + 1 \end{array} \right. \\ GGV^T \end{array} \right.$$

5. Листинг оператора $PerWork(GG, D, Reis, List, i, j, \rho, \tau)$

```

PerWork (GG, D, Reis, List, i, j, \rho, \tau) :=
  AN ← cols (Air)
  GG1 ← GG
  col ← cols (GG1)
  tip ← Air2, Reis
  tcoef ← Tctip
  vecOur ← (i j \rho)T
  \Delta ← 0
  Rez ← veczero (col)
  NW ← 1
  OurList ← Medzero · List
  \delta ← 0
  while (\delta = 0) ∧ (NW ≤ cols (List))
    if vecOur = OurList\langle NW \rangle
      \Delta ← floor [0.2 · (tcoef · List5, NW + 5)]
      \delta ← 1
    else
      NW ← NW + 1
  if \Delta > 0
    colbr ← rows (GG1)
    Rect ← 1000
    for br ∈ 1..colbr
      T ← (GG1T)\langle br \rangle
      brPL ← -Tcol-1
      \Delta2 ← if (brPL = AN + 1, 0, TimeBetw (D, Reis, brPL))
      \DeltaAll ← \Delta + \Delta2
      \delta ← 0
      t ← \tau - \Delta2
      while (\delta = 0) ∧ (t + \DeltaAll < col)
        \delta ← 1
        for v ∈ t..t + \DeltaAll
          \delta ← \delta · if (Tv = -1, \delta, 0)
        t ← t + 1 if \delta = 0
      if Rect > t
        Rect ← t
        RecBr ← br
      Rez ← (GG1T)\langle RecBr \rangle
      for v ∈ Rect .. Rect + \DeltaAll - 1
        Rezv ← (100 · Reis + NW) · if (v ≤ Rect + \Delta2, -1, 1)
      Rezcol ← 1000 · Reis + Rect + \DeltaAll
      ccol ← col - 1
      Rezccol ← -Air4, Reis
      GGNew ← CorrStBr (GG1, RecBr, Rez)
    GGNew ← GG1 otherwise

```


6. Листинг оператора $PerNetCh(Reis, D, ggBtAll, List, \tau)$

```

PerNetCh(Reis, D, ggBtAll, List,  $\tau$ ) :=
  ggBtAllNew  $\leftarrow$  ggBtAll
  col  $\leftarrow$  cols(ggBtAll)
  numW  $\leftarrow$  cols(List)
  numEv  $\leftarrow$  NumEv(List)
  for i  $\in$  1..numEv
    StEv1  $\leftarrow$   $\tau$ 
  for j  $\in$  2..numEv
    VSet  $\leftarrow$  Pred(j, List)
    for  $\eta \in$  1..cols(VSet)
      if VSet1, $\eta$   $\neq$  0
        i  $\leftarrow$  VSet1, $\eta$ 
         $\rho \leftarrow$  VSet2, $\eta$ 
        t  $\leftarrow$  StEv1
        GG  $\leftarrow$  ggBp( $\rho$ , ggBtAllNew)
        GGNew  $\leftarrow$  PerWork(GG, D, Reis, List, i, j,  $\rho$ , t)
        ggBtAllNew  $\leftarrow$  ggBpIn( $\rho$ , ggBtAllNew, GGNew)
        endW $\eta$   $\leftarrow$  t
        for  $\theta \in$  1..rows(GGNew)
          Code  $\leftarrow$  Filter(GGNew $\theta$ , col)
          endW $\eta$   $\leftarrow$  if(Code2 = Reis, Code1, endW $\eta$ )
        StEvj  $\leftarrow$  max(endW)
  ggBtAllNew

```

7. Листинг оператора *OutAir(AirList, ggBtAll)*

```

OutAir(AirList, Perf) := | n ← cols(AirList)
                        | for i ∈ 1..n
                        |   | R1,i ← 200
                        |   | R2,i ← 0
                        | for br ∈ 1..rows(Perf)
                        |   for t ∈ 2..cols(Perf) – 2
                        |     if Perfbr,t > 0
                        |       | Code ← Filter(Perfbr,t)
                        |       | NumA ← Code2
                        |       | R1,NumA ← if(R1,NumA > t, t, R1,NumA)
                        |       | R2,NumA ← if(R2,NumA < t, t, R2,NumA)
                        | R

```

8. Листинг оператора *WorkInterval(Reis, List, ggBtAll)*

```

WorkInterval (Reis, List, Perf) := | col ← cols(List)
                                    | for η ∈ 1..col
                                    |   | R1,η ← 200
                                    |   | R2,η ← 0
                                    | for br ∈ 1..rows(Perf)
                                    |   for t ∈ 1..cols(Perf) – 3
                                    |     if Perfbr,t > 0
                                    |       | Code ← Filter(Perfbr,t)
                                    |       | NumW ← Code1
                                    |       | NumA ← Code2
                                    |       | if NumA = Reis
                                    |       |   | R1,NumW ← if(R1,NumW > t, t, R1,NumW)
                                    |       |   | R2,NumW ← if(R2,NumW < t, t, R2,NumW)
                                    | R

```

Листинг оператора *NetwChartReis(List, WInt)*

```

NetwChartReis (List , WInt ) :=
  numEv ← NumEv (List )
  numW ← cols (List )
  for j ∈ 1 .. numEv
    StEvj ← 0
  VFoll ← Follower (1, List )
  for η ∈ 1 .. cols (VFoll )
    j ← if(VFoll1, η ≠ 0, VFoll1, η - 1, 0)
    eendWη ← if(j ≠ 0, WInt1, j, 200)
  StEv1 ← min(eendW )
  for j ∈ 1 .. numEv - 1
    VSet ← PrecWor (j + 1, List)T
    for η ∈ 1 .. rows (VSet )
      w ← VSetη
      eendWη, j ← if(w ≠ 0, WInt2, w, 0)
    StEvj+1 ← max(eendW⟨j⟩)
  StEvT

```

9. Листинг оператора *StochWork(η, List, ListAtt)*

```

StochWork (η, List , ListAtt , ListDistr ) :=
  XΣ ← List5, η
  p ← ListAtt1, η
  R ← rnd(1)
  if R < p
    code ← ListAtt2, η
    X1 ← StochDurat (2, code , ListDistr )1
    XΣ ← XΣ + X1
  ListSt ← List
  ListSt5, η ← XΣ
  ListSt

```

Листинг оператора *StochDurat*(η, n)

```

StochDurat ( n , cod , ListAtt ) :=
  if ( cod = 1 ) ∨ ( cod = 4 ) ∨ ( cod = 7 )
    | α ← ListDistr 2 , cod
    | β ← ListDistr 3 , cod
    | R ← runif ( n , α , β )
  otherwise
    if ( cod = 2 ) ∨ ( cod = 6 )
      | λ ← ListDistr 2 , cod
      | R ← rexp ( n , λ )
    otherwise
      if cod = 5
        | μ ← ListDistr 2 , cod
        | σ ← ListDistr 3 , cod
        | R ← rnorm ( n , μ , σ )
      otherwise
        if ( cod = 3 ) ∨ ( cod = 8 )
          | λ ← ListDistr 2 , cod
          | m ← ListDistr 3 , cod
          for j ∈ 1 .. n
            | Z ← rexp ( m , λ )
            | Rj ← ZT · ed ( m )
          R ← ( 0 0 )T otherwise
  R

```

10. Листинг оператора *WorkNumCont*(M)

```

WorkNumCont ( M ) :=
  | R ← 0
  | MPr ← 0
  for i ∈ 1 .. rows ( M )
    for j ∈ 1 .. cols ( M ) - 1
      if ( Mi,j > 0 ) ∧ ( Mi,j ≠ MPr )
        | R ← R + 1
        | MPr ← Mi,j
  R

```