

На правах рукописи



Короткова Юлия Леонидовна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДАЧ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СИНТЕЗА И
РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСПИСАНИЙ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ
АВИАКОМПАНИИ**

Специальность 2.3.1. – Системный анализ,
управление и обработка информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Мезенцев Юрий Анатольевич**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Скатков Александр Владимирович**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационные технологии и компьютерные системы» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь

Сервах Владимир Вицентьевич
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник Омского филиала федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт математики им. С.Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук», г. Омск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Новосибирск.

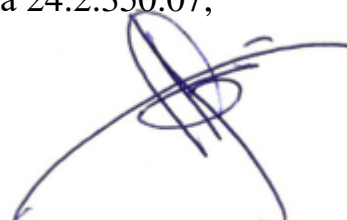
Защита диссертации состоится «18» мая 2023 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.350.07, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет», по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, д. 11, Главный корпус, ауд. П-202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОмГТУ и на сайте www.omgtu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира 11, ОмГТУ, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.350.07. Тел.: (3812) 65-24-79. E-mail: dissov_omgtu@omgtu.ru.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.350.07,
кандидат технических наук, доцент

 А. С. Грицай

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одной из традиционных областей применения методов оптимизации является авиация. И поскольку расписание – это основа производственного процесса любой авиакомпании, задачи, связанные с планированием и управлением расписанием, являются наиболее актуальными и при этом наиболее сложными.

Процессы планирования и управления расписанием могут быть разделены по уровню: стратегические, месячные, оперативные. Стратегическое планирование предполагает синтез расписания на сезон, исходя из коммерчески обоснованного перечня маршрутов, типов воздушных судов (ВС), плановых времен полета и обслуживания в аэропортах оперирования. На этапе месячного планирования выполняется процесс распределения ВС по рейсам, а также решение отдельного блока задач, связанного с планированием экипажей и технического обслуживания. В силу того, что деятельность любой авиакомпании подвержена изменениям, вызываемым как внешней, так и внутренней средой, плановое расписание нуждается в постоянном управлении и контроле. Процесс регулирования назначений ВС по рейсам в рамках суточного плана полетов называется оперативным управлением.

Сложность решения задач управления расписанием авиакомпании обусловлена не только большим количеством переменных, но и необходимостью учета всевозможных ограничений. Можно выделить такие ограничения, как необходимость выполнения технического обслуживания ВС в определенные периоды времени, ограничения по емкостям при изменении типов ВС, ограничения аэропортов оперирования по параметрам пропускной способности при корректировке времен отправления и прибытия и т.д.

В работе исследуются задачи оптимального *оперативного* регулирования назначений ВС по рейсам авиакомпании. При оперативном управлении расписанием в сбойной ситуации, когда имеет место отклонение от запланированного графика, лицо, непосредственно принимающее решение (в данном случае – сотрудник центра управления полетами авиакомпании), в критически короткие сроки должен выполнить анализ огромного количества возможных сценариев с учетом ряда ограничений и условий. Такие задачи относятся к классу NP-трудных, а учитывая потребность авиакомпаний в получении моментального решения, требуют применения специальных алгоритмов быстрого приближенного решения, направленных на повышение эффективности управления производственной системой авиакомпании. Противоречие между трудоемкостью и необходимостью решения задачи в реальном времени обосновывает актуальность темы исследования.

Степень разработанности проблемы. В ходе диссертационного исследования был изучен широкий круг научных работ отечественных и зарубежных авторов, в том числе классические труды в области дискретной оптимизации и смежных разделах, работы современных авторов, теоретиков и практиков. Развитием данного направления науки занимались отечественные и

зарубежные ученые: Танаев В.С., Струсевиц В.А., Гимади Э.Х., Канев В.С., Севастьянов С. В., Кононов А.В., Хачай М.Ю., Мезенцев Ю.А., Моудер Дж. и др.

Исследование прикладных задач управления графиками движения ВС в случаях отклонения от заданного плана началось в 1980-х годах и продолжается в настоящее время. С 1984 года по июнь 2020 года опубликовано, в общей сложности, 110 статей. Это работы таких ученых как Abara J., Teodorovic D., Jarrah A.I.Z., Arguello M.F., Cao J.M., Yan S., Talluri K.T., Clarke J.P., Barnhart C., Hu Y., Zhu J.F., Wang Zh., Grönkvist M., Andersson T., Eggenberg N., Sinclair K. и др. При этом только за последние 10 лет опубликовано более половины работ. Это позволяет утверждать, что интерес к решению проблем управления расписаниями в сбойных ситуациях растет.

Анализ научных публикаций по теме исследования позволяет утверждать, что, несмотря на значительное количество работ, непосредственно посвященных задаче управления расписаниями в сбойных ситуациях (при отклонении от запланированных графиков), достигнутые к настоящему времени, как теоретические, так и практические результаты едва ли можно считать удовлетворительными. Это следует из того, что ни один из существующих подходов не гарантирует получения оптимального решения даже при обособленном рассмотрении задачи переназначения ВС, без учета требований по переработке графиков работы экипажей, маршрутов следования пассажиров и т.д., так как применяются либо весьма приближенные алгоритмы, либо эвристики, неконтролируемо сужающие пространство поиска. Также можно сделать вывод об отсутствии алгоритма нахождения связанных цепочек оптимальных назначений для каждого ВС с доказанной эффективностью и должным быстродействием.

Таким образом, для эффективного *оперативного* управления расписанием авиакомпании оказывается актуальной задача разработки инструментария синтеза и регулирования назначений и расписаний флота ВС в режиме реального времени. Разработка и применение эффективного метода в системах поддержки принятия решений позволит минимизировать потери авиакомпаний.

Объект исследования – данные о структуре расписания, факторы, влияющие на принятие решения о корректировке назначений ВС на рейсы.

Предмет исследования – модели и алгоритмы принятия решения о переназначении ВС в рамках оперативного управления расписаниями.

Целью диссертационной работы является разработка вычислительно эффективного метода для обоснованного принятия решения по оптимизации назначений ВС по рейсам в рамках суточного плана полетов, исходя из совокупности ожидаемых или реализовавшихся событий. Под вычислительной эффективностью понимается трудоемкость поиска решения рассматриваемой задачи дискретной оптимизации.

Для достижения поставленной цели были выделены следующие **задачи исследования**:

1) Формализация задачи по управлению назначениями ВС, относящейся к классу задач теории расписаний, а именно – к задаче оптимизации расписаний

параллельно-последовательных систем с задержками начала обслуживания и неопределенными маршрутами обслуживания.

2) Критический анализ существующих методов, моделей и программных средств для решения задачи управления назначениями ВС.

3) Разработка вычислительно эффективных методов решения задачи оптимального управления расписанием авиакомпании в режиме реального времени.

4) Исследование и определение критерия эффективности оперативного управления парком ВС авиакомпании.

5) Программная реализация разработанного алгоритма.

6) Апробация разработанного алгоритма на данных расписания действующей авиакомпании. Оценка эффекта от применения разработанного инструментария, экспериментальное доказательство эффективности использования алгоритма.

Научная новизна. В процессе исследований получены следующие новые научные результаты.

1. Разработана постановка задачи регулирования расписаний параллельно-последовательных систем с задержками начала обслуживания, отличающая учетом фактора формирования связанных технологических маршрутов, заранее не определенных, и позволяющая решать задачу любых размерностей. Таким образом, одновременно решаются динамическая задача маршрутизации и задача синтеза расписания, приближенного к оптимальному.

2. Разработан алгоритм решения дискретной задачи оптимизации управления расписанием авиакомпании, отличающийся высокой эффективностью с точки зрения быстродействия и подходящий для решения задач любой размерности. Предложенный алгоритм основан на декомпозиции, линейной релаксации и быстром поэтапном решении, переводящим задачу в класс полиномиально разрешимых, что принципиально отличает его от всех известных ранее.

3. Предложен принципиально новый, ранее не применявшийся, критерий для оценки эффективности полученного расписания, основанный на применении риск-ориентированного подхода. Отличие данного подхода от всех ранее использовавшихся заключается в нахождении баланса между количеством и величиной задержек, что позволяет получить устойчивое расписание.

Теоретическая значимость результатов исследования заключается в том, что получила развитие концепция оптимального управления сложными технологическими системами, реализуемая посредством инструментария моделей и методов дискретной оптимизации. В частности, сформулированы NP-трудные задачи управления технологической системой, решение которых стало возможным в режиме реального времени за счет развития и программной реализации методов неполной декомпозиции в сочетании с алгоритмами смешанного целочисленного программирования, эвристическими процедурами релаксации и разбиения исходного множества альтернатив.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что предложенный подход может применяться в авиакомпаниях любого размера для принятия решения о необходимости корректировки назначений ВС в случае отклонения от суточного плана полетов. Применение разработанного программного комплекса позволяет повысить эффективность системы принятия решений авиакомпании за счет применения методов оптимизации и эффективных критериев, а также сократить суммарное время потенциальных задержек на 50%.

Результаты диссертационной работы внедрены на действующем предприятии транспортной отрасли, в АО «Авиакомпания «Сибирь». Помимо разработанного программного комплекса, на предприятии используется предложенная методика оценки расписания авиакомпании, основанная на риск-ориентированном подходе.

Кроме того, результаты работы внедрены в учебный процесс Новосибирского государственного технического университета на кафедре автоматизированных систем управления в курсах «Системный анализ и исследование операций», «Методы оптимизации». Оригинальное математическое обеспечение, реализованное в ходе диссертационного исследования, успешно применяется в научно-исследовательских работах студентов при выполнении квалификационных работ бакалавров и магистерских диссертаций.

Методология и методы исследования. В работе развиваются подходы к созданию вычислительно эффективных алгоритмов быстрого приближенного решения дискретной задачи оптимизации управления расписанием авиакомпании. Основные теоретические результаты работы базируются на точных и приближенных методах системного анализа и исследования операций, непрерывной и дискретной оптимизации, включая барьерно-ньютоновские методы, методы декомпозиции, линеаризации, ветвлений и отсечений, динамического программирования, а также ряда эвристических алгоритмов.

Положения работы, выносимые на защиту:

1. Постановка задачи синтеза оптимальных расписаний многостадийной параллельно-последовательной обслуживающей системы (применительно к оптимальному оперативному управлению расписанием авиакомпании).

2. Результаты исследования применимости критерия минимизации уровня риска нарушения пунктуальности для решения задачи оперативного управления расписанием авиакомпании.

3. Декомпозиционный алгоритм решения задачи оптимизации расписаний параллельно-последовательных обслуживающей системы.

4. Прототип системы поддержки принятия управленческих решений, реализующий представленные методы решения задач управления назначениями воздушных судов.

Соответствие паспорту специальности. Полученные научные результаты соответствует п. 2 «Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», п. 3. «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и

обработки информации», п. 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации» и п. 9 «Разработка проблемно-ориентированных систем управления, принятия решений и оптимизации технических, экономических, биологических, медицинских и социальных объектов» паспорта научной специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации» (в соответствии с новой номенклатурой научных специальностей - 2.3.1. – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»).

Степень достоверности результатов работы. Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, содержащихся в диссертационной работе, подтверждается вычислительными экспериментами и полученными апостериорными оценками точности и быстродействия всех разработанных в рамках диссертационной работы алгоритмов оптимизации.

Представленное в диссертационной работе исследование выполнялось при поддержке гранта Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект 19-37-90012) «Информационные технологии и математические методы оптимального оперативного управления графиком движения воздушных судов авиакомпании» и стал одним из составляющих проекта FSUN-2020-0009 (мнемокод 0735-2020-0009) «Моделирование системной организации когнитивных функций с применением интеллектуального анализа массивов психометрических и нейрофизиологических данных».

Апробация результатов диссертации. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием им. В.В. Губарева «Интеллектуальный анализ сигналов, данных и знаний: методы и средства» (Новосибирск, 2018 г.); XXV международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» (Севастополь, 2018 г.); Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Е. А. Барбашина (Минск, 2018 г.); V международной конференции и молодежной школы "Информационные технологии и нанотехнологии (Самара, 2019 г.); 14-ом Международном форуме по стратегическим технологиям IFOST (Томск, 2019 г.); XX Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Новосибирск, 2019 г.); XV Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (Новосибирск, 2021 г.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 14 научных работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 3 статьи в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, а также 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора. Все представленные в диссертации результаты исследований получены лично автором или при его непосредственном участии. Доля личного вклада в работах, выполненных в соавторстве, составляет не менее 70%. Автор внёс определяющий вклад в постановку задач, им выполнен анализ существующих подходов к решению, произведены вычислительные эксперименты

реализованных алгоритмов принятия решений по переназначению ВС, интерпретированы полученные результаты.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, перечня условных обозначений и сокращений на двух страницах, списка литературы 97 наименований и шести приложений. Общий объем работы составляет 191 страницу, в том числе основной текст на 125 страницах, 24 рисунка и 40 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, дана характеристика степени разработанности проблемы, определены цель, задачи, объект и предмет исследования, описана научная новизна, показана теоретическая и практическая значимость работы, перечислены методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации, указан личный вклад соискателя.

В первой главе рассматривается общая задача управления расписаниями авиакомпании по этапам, предоставлена справка по ретроспективе исследований по теме, а также выполнена содержательная постановка задачи оптимизации оперативного управления назначениями ВС на рейсы.

Содержательно задача оперативного управления заключается в таком перераспределении ВС по рейсам авиакомпании за планируемый период, которое минимизирует суммарное отклонение времени выполнения всех рейсов от планового расписания (либо минимизирует суммарное отклонение по всем рейсам от исходного планового расписания) при условии, что:

- не будет ни одного рейса с отсутствующим назначением ВС;
- для каждого рейса будет назначен только один борт;
- количество распределенных на рейсы ВС не будет превышать входящие ограничения;
- ВС, назначенные на рейсы, будут логически связаны по времени и местам стыковок.

Для расчетов потребуются нижеследующие входные данные:

- ограничения по количеству ВС, доступных для назначения (количество ВС, которые будут в дальнейшем распределены по рейсам, может быть меньше номенклатурной численности ВС в парке ввиду необходимости резервирования ВС на случай сбойных ситуаций);
- плановое расписание ВС, включающее в себя перечень рейсов с уникальными идентификаторами и маршрутами следования, плановые времена отправления и прибытия по каждому рейсу, информация о текущих назначениях ВС на рейсы;
- оперативная информация о текущих задержках рейсов на заданный момент времени во всех аэропортах;
- справочная информация о минимальных временах наземного обслуживания ВС.

Минимальное время наземного обслуживания определяется для каждого аэропорта (исходя из его ресурсов и возможностей), а также для каждого типа ВС (исходя из его технических характеристик). Этот параметр необходим для того, чтобы обеспечить требуемый резерв времени для подготовки ВС к следующему рейсу, а также для того, чтобы минимизировать влияние задержек на последующие рейсы, последовательно выполняемые воздушным судном. Предположим, борт j прибыл в аэропорт с задержкой и начинает подготовку к выполнению рейса i , на котором ожидается задержка вылета ввиду позднего прибытия борта j . В этом случае аэропортовые службы стремятся выполнить подготовку борта j к рейсу i в ускоренном режиме. Таким образом, задержка вылета рейса i должна быть рассчитана с учетом минимального времени подготовки борта j , поскольку благодаря ускоренному обслуживанию, задержка рейса i может быть минимизирована или полностью купирована.

Во второй главе предложены оригинальные постановки задачи оперативного оптимального управления расписаниями авиакомпаний и модификации этих постановок.

Первоначальная формальная постановка поставленной задачи разработана с применением рекурсий, поскольку задержка каждого последующего рейса зависит от задержек предыдущих рейсов. Данная постановка оказалась неэффективной с точки зрения поиска алгоритмов быстрого решения, поскольку приводит к полному перебору допустимых решений.

В работе описывается альтернативный оригинальный подход на основе формализации задачи с дизъюнкциями в ограничениях. Приводится доказательство эквивалентности постановки с дизъюнкциями в ограничениях и постановки с рекурсиями.

Предложенная модификация позволила уйти от рекурсий, но привела к значительному увеличению размерности. Приведем оценку размерности постановки с дизъюнкциями для авиакомпании среднего размера.

Пусть в парке авиакомпании имеется J $[10 \div 30]$ ВС, которые должны быть назначены на рейсы $i = \overline{1, I}$, где I $[100 \div 300]$ – общее число рейсов. Оценка числа булевых переменных $J \cdot I^2 \cdot (I - 1) / 2 + J \cdot I = 30 \cdot 300^2 \cdot 299 / 2 + 30 \cdot 300 = 403.659.000$, т.е. более 400 миллионов. По этой причине использование постановки с дизъюнкциями в ограничениях в чистом виде для построения расписаний, даже после элиминации части переменных, с применением точных алгоритмов весьма затруднительно.

С целью сокращения размерности в главе 2 представлена релаксация задачи с дизъюнкциями в ограничениях путем априорного назначения последовательности выполнения рейсов. Размерность задачи удалось сократить на много порядков. Таким образом, для авиакомпании с обозначенными выше характеристиками, где J $[10 \div 30]$ – количество ВС, I $[100 \div 300]$ – общее количество рейсов, оценка числа булевых переменных составит $I \cdot J = 300 \cdot 30 = 9000$. Приведем эту постановку.

Обозначим задержку начала выполнения i -го рейса воздушным судном j через $\tau_{i,j}^0$. Если упорядочить рейсы для каждого ВС авиакомпании по возрастанию $\tau_{i,j}^0$, то $T^0 = \|\tau_{i,j}^0\|$, $j = \overline{1, J}, i = \overline{1, I}$ можно интерпретировать как расписание на входе каждого из ВС. Здесь I - общее число рейсов, J - число ВС. Более точно $\tau_{i,j}^0$ - рассчитанные задержки вылета всех ВС на момент корректировки расписания от 00:00 часов с учетом расписания S_i и текущих задержек рейсов.

Также введем непрерывные переменные $C_{i,j} \geq \tau_{i,j}^0$ - время вылета рейса i при назначении на ВС j , и C_i времени вылета рейса i , $i = \overline{1, I}$ (очевидно $C_i = \sum_{j=1}^J C_{i,j}$).

Через $x_{i,j}$ обозначим булевы переменные-назначения ВС j на рейс i , подлежащие определению.

Требуется найти $x_{i,j}, C_i, C_{i,j}, \Delta$ при условиях:

$$\sum_{j=1}^J x_{i,j} = 1, \quad i = \overline{1, I}, \quad (1)$$

$$\underline{b}_j \leq \sum_{i=1}^I x_{i,j} \leq \overline{b}_j, \quad j = \overline{1, J}, \quad (2)$$

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если рейс } i \text{ назначен ВС } j, \\ 0 & \text{в противном случае, } i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}, \end{cases} \quad (3)$$

$$C_{i,j} \geq S_i, \quad i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}, \quad (4)$$

$$C_{i,j} \geq \tau_{i,j}^0 x_{i,j}, \quad i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}, \quad (5)$$

$$C_{i,j} + t_{i,j} x_{i,j} \leq C_{k,j}, \quad i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}, \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^J \tau_{i,j}^0 x_{i,j} \leq C_i, \quad i = \overline{1, I}, \quad (7)$$

$$\Delta = \sum_{i=1}^I \left(C_i - S_i \sum_{j=1}^J x_{i,j} \right) \rightarrow \min. \quad (8)$$

Здесь (8) определяет условие минимизации отклонения скорректированного расписания от запланированного.

В третьей главе уделено внимание выбору критерия эффективности расписания авиакомпании, поскольку его правильный выбор играет существенную роль с точки зрения принятия решений.

Опираясь на экспертизу в области управления производственными процессами авиакомпании, предложен оригинальный критерий минимизации риска нарушения пунктуальности рейсов. Пунктуальность – один из важнейших показателей эффективности транспортной системы. В широком смысле пунктуальность (R_{dep}) – это выраженное в процентах отношение количества рейсов, выполненных с допустимой задержкой, к общему количеству выполненных рейсов. Приведем формулу расчета пунктуальности:

$$R_{dep} = \frac{K_d}{I} \cdot 100\% \quad (9)$$

Здесь K_d – количество рейсов, у которых задержка отправления $\tau_i^0 \leq T$ (T – время допустимой задержки); I – общее число отправленных рейсов.

Важность показателя пунктуальности для авиакомпаний обусловлена множеством факторов: пунктуальность напрямую влияет на лояльность клиентов авиакомпании; несоблюдение плановых времен вылета и прибытия рейсов приводит к дополнительным расходам для авиакомпаний, связанных с обслуживанием пассажиров и рейсов, а также всевозможными штрафными санкциями со стороны обслуживающих компаний; авиакомпании, выполняющие рейсы с хорошей пунктуальностью, могут получить дополнительные скидки на наземное обслуживание от аэропортов.

Основная идея заключается в нахождении баланса между количеством задержек и их длительностью путем минимизации уровня риска нарушения пунктуальности (R).

Один из возможных способов оценки уровня риска основан на применении «Матрицы последствий и частот возникновения отклонений». Входными данными для построения матрицы являются шкалы тяжести отклонения и частот возникновения негативных отклонений. Для рассматриваемого критерия «Пунктуальность отправлений» ранг тяжести может быть выражен через величину задержки (то есть величину отклонения фактического времени вылета от планового), а ранг частоты – через количество задержек. Уровень риска при этом может быть определен как произведение ранга тяжести и частоты негативных отклонений.

Приведем пример определения ранга тяжести конкретного рейса. Основой для расчета ранга является шкала, которая устанавливается в соответствии с требованиями предприятия и может иметь любое количество точек (таблица 1).

Таблица 1 – Пример соотношения задержек и ранга тяжести отклонений

Ранг тяжести негативного отклонения F_i	Время задержки, минут τ_i^0
1	[1; 5]
2	(5;10]
3	(10; 15]

4	(15; 20]
5	Более 20 минут

Ранг тяжести задержки конкретного рейса F_i [0÷5] определяется по формуле:

$$F_i = \min \left[5; a \cdot \ln \left(1 + b \cdot \tau_i^0 \right) \right] \quad (10)$$

Здесь τ_i^0 – величина задержки начала выполнения i -го рейса; $\tau_{i,j}^0$ – величина задержки начала выполнения i -го рейса на ВС j , $\tau_i^0 > T$, $\tau_{i,j}^0 > T$; T – время допустимой задержки в минутах; a и b – оценка коэффициентов логарифмической функции методом наименьших квадратов (рисунок 1). Применение логарифмической функции позволяет получить наиболее точную эмпирическую оценку ранга в формате неперядкового числительного.

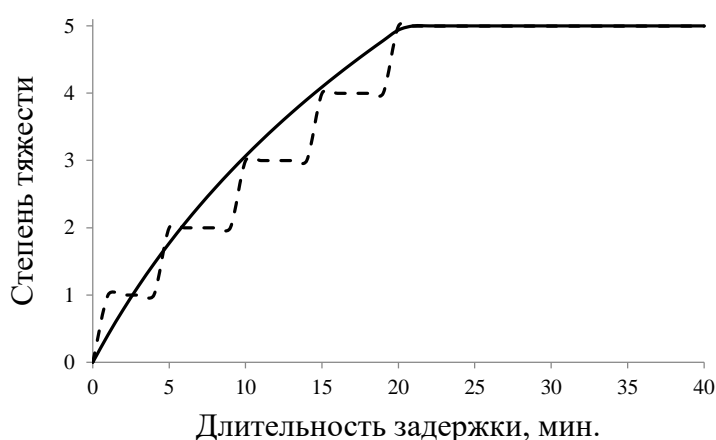


Рисунок 1 – График зависимости ранга тяжести от времени задержки

Ранг частоты (11) возникновения задержек определяется с помощью аналогичного подхода.

$$P = \min \left[5; a \cdot \ln \left(1 + b \cdot (1 - R_{dep}) \right) \right] \quad (11)$$

Здесь a и b – коэффициенты логарифмической функции; $(1 - R_{dep})$ – доля рейсов с задержкой отправления.

Итоговый уровень риска по критерию «Пунктуальность отправлений» может быть записан как сумма произведения средней степени тяжести F_i по всем рейсам и ранга частоты негативного отклонения P :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^I F_i}{I} \cdot P \rightarrow \min \quad (12)$$

Предложенный риск-ориентированный подход успешно применяется в крупнейшем предприятии авиатранспортной отрасли РФ, что подтверждено соответствующим Актом.

Четвертая глава диссертации посвящена разработке вычислительно эффективных методов решения дискретных задач оптимизации управления сложными производственными процессами, к которым относится оперативное управление расписанием авиакомпаний.

Приведены результаты применения формализации с дизъюнкциями в ограничениях и априорным назначением последовательности выполнения рейсов на данных расписания действующей авиакомпании. Выявлено, что постановка не позволяет найти оптимальное решение в связи с недоучетом факторов формирования связанных цепочек рейсов. Цепочка рейсов – это технологический маршрут, он заранее не определен. Для решения данной проблемы выполнена разработка нового вычислительно эффективного метода решения поставленной задачи дискретной оптимизации, использующего декомпозиционный подход, линейную релаксацию и быстрое поэтапное решение релаксированных подзадач, что позволяет перевести NP-трудную задачу управления назначения ВС в класс полиномиально разрешимых. Для решения задачи была применена неполная декомпозиция с релаксацией и использование быстрого эвристического многошагового алгоритма впоследствии.

Сформулируем подзадачу назначения единственного рейса на каждое из P_V ВС на шаге V . Как отмечалось ранее, исходно имеем:

J - число ВС, где j - номер ВС, $j = \overline{1, J}$;

I - число рейсов, i - номер рейса, $i = \overline{1, I}$, положим $I \geq J$;

S_i - исходное расписание вылета рейса $i = \overline{1, I}$;

Пусть I_V - подмножество рейсов, переназначаемых на шаге V , $V = \overline{1, N}$, где N - число подзадач и шагов алгоритма. Тогда номера рейсов на шаге v принадлежат I_V ($i \in I_V$), $\bigcap_{v=1}^N I_V = \emptyset$, это условие фактически означает, что назначения ВС на рейсы на шаге V не могут быть переназначены на последующих шагах.

Через Δ_V обозначим суммарное отклонение расписаний на шаге V от исходного, через C_i - пересчитанное время вылета рейса i на шаге V , ($i \in I_V$).

Как и ранее, определим переменные назначений ВС на рейсы.

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если рейс } i \text{ назначен ВС } j \text{ на шаге } v, j = \overline{1, J}, i \in I_V. \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (13)$$

Тогда подзадача назначения единственного рейса на каждое из P_V ВС на шаге V , $P_V \leq [J / 2], v = \overline{1, N}$ принимает вид:

Найти $x_{i,j}$, C_i , Δ_V при условиях:

$$0 \leq x_{i,j} \leq 1, j = \overline{1, J}, i \in I_V, \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{i,j} \leq 1, \quad i \in I_\nu, \quad (15)$$

$$\sum_{i \in I_\nu} x_{i,j} \leq 1, \quad j = \overline{1, J}, \quad (16)$$

$$\sum_{i \in I_\nu} \sum_{j=1}^J x_{i,j} \geq P_\nu, \quad P_\nu \leq [J / 2], \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^J \tau_{i,j}^0 x_{i,j} \leq C_i, \quad i \in I_\nu, \quad (18)$$

$$\Delta_\nu = \sum_{i \in I_\nu} \left(C_i - S_i \sum_{j=1}^J x_{i,j} \right) \rightarrow \min, \quad (19)$$

где $[\cdot]$ целая часть числа, и $\sum_{\nu=1}^N P_\nu = I$.

С учетом абсолютной унимодулярности условий (14)–(17), булевы переменные можно заменить непрерывными с интервальными ограничениями: $0 \leq x_{i,j} \leq 1, \quad j = \overline{1, J}, \quad i \in I_\nu$.

После любого шага ν задержки $\tau_{i,j}^0, \quad i \in I_\nu, \quad j = \overline{1, J}$ должны быть пересчитаны. Координирующая задача:

$$\sum_{\nu=1}^N P_\nu = I \quad (20)$$

$$\Delta = \sum_{\nu=1}^N \Delta_\nu \rightarrow \min \quad (21)$$

Обе задачи полиномиально разрешимы. Соответственно, пошаговый алгоритм приближенного решения задачи оптимального регулирования расписания вылетов ВС имеет полиномиальную трудоемкость. Приводим его запись, обозначив ее как A_ν .

Алгоритм A_ν .

1. Исходные данные – множества ВС $\{1, 2, \dots, J\}$ и рейсов $\{1, 2, \dots, I\}$, известно исходное расписание вылетов рейсов $S_i, \quad i = \overline{1, I}$ и $t_{i,j}$ - время перелета, разворота и подготовки рейса i ВС j . Разбиение множества рейсов, упорядоченных по времени вылета $S_i, \quad i = \overline{1, I}$ на последовательность подмножеств $\{I_1, I_2, \dots, I_\nu, \dots, I_N\}$ априорно не определено, однако можно заранее задать числа элементов этих подмножеств посредством последовательности, $\{P_1, P_2, \dots, P_\nu, \dots, P_N\}$.

Дополнительные условия такого разбиения $P_\nu \leq [J/2], \nu = \overline{1, N}$, $[\cdot]$ целая часть

числа, и $\sum_{\nu=1}^N P_\nu = I$.

2. Задаем номер шага $\nu := 0$.

3. Увеличиваем номер шага $\nu := \nu + 1$. Вычисляем возможные задержки рейсов для всех ВС на шаге ν $\tau_{i,j}^0, i \in I_\nu, j = \overline{1, J}$.

4. Решаем подзадачу (1)-(6). Фиксируем оптимальные назначения $x_{i,j}^*$, $j = \overline{1, J}, i \in I_\nu$, скорректированное расписание вылетов C_i^* , $i \in I_\nu$ и значение критерия Δ_ν^* .

5. Проверка на окончание алгоритма: при выполнении условия $\nu = N$ следующий пункт. Иначе возврат к 3.

6. Объединение назначений, полученных на всех предшествующих шагах $x_{i,j}^*, j = \overline{1, J}, i \in I_\nu, \nu = \overline{1, N}$, расписаний вылета, $C_i^*, i \in I_\nu, \nu = \overline{1, N}$ и вычисление общего времени отклонения от исходного расписания $\Delta = \sum_{\nu=1}^N \Delta_\nu^*$.

Совершенно очевидна полиномиальная трудоемкость алгоритма в виду отсутствия цикличности обращений к подзадачам (14)-(19) класса линейного программирования при решении координирующей задачи (20)-(21).

Также в главе 4 представлены результаты вычислительных экспериментов алгоритмов принятия решений по переназначению ВС и их содержательная интерпретация на примере небольшого фрагмента суточного расписания авиакомпании. Приведенные в работе результаты вычислительных экспериментов свидетельствуют о высокой эффективности решения как с точки зрения быстродействия, так и с точки зрения принятия оптимального решения (таблица 2). Время счета одного варианта корректировки расписания для любого разбиения и исходных данных, обозначенной выше размерности, составляет несколько секунд при использовании настольного компьютера. Суммарное отклонение от исходного расписания сокращается более чем на 50%.

Таблица 2– Сравнение параметров расчетного расписания для различных вариантов разбиения исходных данных (A_1, A_2, A_3, A_4) и фактического расписания, полученного на основе экспертизы центра управления полетами.

	Факт	A_1	A_2	A_3	A_4
Доля рейсов с задержкой, %	50,0	26,7	26,7	27,8	24,4
Суммарное время задержек, мин.	2405	975	1083	938	1003
Уровень риска	9,5	4,5	4,4	4,9	3,5
Всего рейсов, шт.	90	90	90	90	90

Отмечается факт наличия зависимости конечного результата решения общей задачи оптимального регулирования расписания от исходного разбиения

$\{I_1, I_2, \dots, I_\nu, \dots, I_N\}$, и, следовательно, от набора $\{P_1, P_2, \dots, P_\nu, \dots, P_N\}$. Вариантов выбора числа переназначаемых рейсов по шагам $\{P_1, P_2, \dots, P_\nu, \dots, P_N\}$ может быть сколь угодно много. В то же время вычислительные эксперименты показывают незначительность изменений значений критерия $\Delta = \sum_{\nu=1}^N \Delta_\nu$ при варьировании

значений P_ν для равных N . Вопрос выбора принципа декомпозиции более глубоко не анализировался, являясь отдельной темой исследования.

В пятой главе выполнено описание программной реализации прототипа интеллектуальной системы поддержки принятия решений в случае необходимости оперативной корректировки графика движения ВС. Функционально прототип системы поддержки принятия решений состоит из программы расчета задержек и корректировки расписания, включающей в себя интерфейс пользователя, модуль расчета задержек и оптимизатора (рисунок 2).



Рисунок 2 – Общая функциональная структура прототипа системы поддержки принятия решений о переназначении ВС

На первом этапе пользователь выполняет подготовку данных для оптимизатора, путем загрузки исходного расписания, а также справочников полетного времени и минимальных времен наземного обслуживания в модуль расчета задержек. Далее пользователь должен выбрать схему декомпозиции исходного расписания, определить количество итераций, указать диапазоны входных данных и произвести запуск пошагового алгоритма оптимизации назначений ВС на рейсы. На заключительном этапе с помощью модуля корректировки расписания производится объединение назначений ВС на рейсы с целью формирования результирующего расписания для внесения в производственную систему авиакомпании.

Общее время выполнения корректировки расписания с использованием разработанного прототипа не превышает 4 минут с учетом трудозатрат на ручную подготовку данных и сборку результатов. Время работы модуля оптимизации – не более 1,5 секунд. Полученные оценки быстродействия позволяют сделать вывод о применимости предложенного инструментария для принятия решения в реальном масштабе времени. Разработанный программный инструментарий прошел государственную регистрацию в качестве программ для ЭВМ, о чём Федеральной службой по интеллектуальной собственности выданы свидетельства № 2020663452 от 28 октября 2020 г, № 2021665658 от 12.10.2021. Применение разработанного программного комплекса подтверждается Актами о внедрении результатов исследования.

В заключении работы подведены итоги проведенного исследования.

Приложения содержат иллюстрации и таблицы, отражающие результаты исследований, свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, копии актов о внедрении результатов работы, а также листинги разработанного программного обеспечения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Проведенное в рамках научной работы исследование представляет собой теоретическую и практическую базу разработанного нового подхода к поддержке процесса оперативного управления расписаниями авиакомпаний.

1. Выполнено структурированное описание предмета исследования, разработана формальная постановка задачи управления назначениями ВС, относящейся к классу задач теории расписаний, а именно – к задачам оптимизации расписаний параллельно-последовательных систем с задержками начала обслуживания и неопределенными маршрутами обслуживания.

2. Выполнен глубокий анализ существующих подходов к решению задачи управления назначениями ВС и обоснование актуальности разработки новых методов и алгоритмов решения. Показана принадлежность описываемой технологической системы числу параллельно-последовательных систем, порождающих наиболее трудоемкие задачи теории расписаний класса NP.

3. Разработан новый вычислительно-эффективный декомпозиционный алгоритм, позволяющий перевести задачу в класс полиномиально разрешимых и пригодный для решения задач сколь угодно больших размерностей.

4. Предложен принципиально новый критерий для оценки эффективности полученного расписания, основанный на применении риск-ориентированного подхода.

5. Разработан прототип системы поддержки принятия решений, реализующий представленные методы управления назначениями ВС. Использование прототипа позволяет сократить время на принятие решения по корректировке назначений до нескольких секунд.

6. Выполнено экспериментальное обоснование эффективности применения предложенных технических решений, согласно которому время потенциальных

задержек может быть сокращено на 50%, а время на принятие решения о корректировке расписания – до нескольких секунд.

7. Определены перспективы развития исследования по теме.

Разработанные методы направлены на повышение скорости принятия решения по оперативной корректировке графика движения ВС в сбойной ситуации, а также на повышение эффективности принимаемого решения в отношении графиков движения. Применение предложенного подхода позволит авиакомпаниям минимизировать отклонения расписания от запланированных параметров и, тем самым, минимизировать потенциальные расходы, связанные с задержками рейсов и обслуживанием пассажиров в сбойных ситуациях.

Дальнейшая разработка представленного в настоящей научной работе подхода может быть направлена на модификацию предложенной постановки в части перечня производственных ограничений, а также исследование наиболее эффективного принципа декомпозиции ввиду выявленного влияния на получаемые результаты.

СПИСОК ОСНОВНЫХ НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. 1. Коротченко, Е. А. Метод оценки рисков «Критерии. События. Правила» / Е. А. Коротченко, Ю. Л. Петрунина // International journal of open information technologies. – 2016. – Vol. 4. – № 5. – С. 52-58. – ISSN 2307-8162.

2. Мезенцев, Ю. А. Задача и инструменты оптимального регулирования расписаний флота авиакомпании / Ю. А. Мезенцев, Ю. Л. Короткова, И. В. Эстрайх // Информационные технологии. – 2020. – Т. 26, № 8. – С. 450-459. – ISSN 1684-6400. – DOI 10.17587/it.26.450-459.

3. Мезенцев, Ю. А. Эффективный алгоритм решения прикладной задачи оптимизации расписаний параллельно-последовательной системы/ Ю. А. Мезенцев, Ю. Л. Короткова, И. В. Эстрайх // Информационные технологии. – 2021. – Т. 27, № 12. – С. 642-650. – ISSN 1684-6400. – DOI 10.17587/it.27.642-650.

4. Мезенцев, Ю. А. Риск-ориентированный подход к решению задачи оперативного управления расписанием авиакомпании / Ю. А. Мезенцев, Ю. Л. Короткова // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 4 (84). – С. 19-36. – ISSN 2782-2001. – DOI 10.17212/2782-2001-2021-4-19-36.

Публикации в изданиях, индексируемых в системе Scopus и/или WoS:

5. Korotkova, Yu.L. The dynamic programming algorithm for management of real-time aircraft assignments / Korotkova, Yu.L., Mezentsev, Yu.A. // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1333, Is. 3. – 7 p. – DOI: 10.1088/1742-6596/1333/3/032040.

6. Korotkova, Y.L., Mezentsev, Y.A., Estraykh, I.V. Tools for solving the problem of optimal regulation of airline fleet schedules. Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1661, Is. 1. – 11 p. – DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012174.

7. Korotkova, Y. L. Application Problem and Effective Algorithm of the Parallel-Sequential System Schedule Optimization / Y. L. Korotkova, Y. A. Mezentsev // XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – Novosibirsk: IEEE, 2021. – 6 p. – DOI: 10.1109/APEIE52976.2021.9647516.

Свидетельства на программы для ЭВМ, базу данных:

8. Программа для расчета задержек и корректировки расписания. Регистрационный номер – 2020663452 от 28.10.2020.

9. Программа для решения задачи оптимизации расписаний параллельно-последовательной системы специального типа. Регистрационный номер – 2021665658 от 12.10.2021.

Публикации в других научных изданиях:

10. Mezentsev Y. A. Formulation of the problem of optimizing operational airline scheduling to minimize flight delays / Y. A. Mezentsev, Y. L. Korotkova // 14 International forum on strategic technology (IFOST 2019): proc., Tomsk, 14–17 Oct. 2019. – Tomsk: TPU Publ. House, 2019. – P. 130–134. – ISBN 978-5-4387-0906-0.

11. Короткова Ю. Л. Постановка задачи оптимального оперативного управления графиком движения воздушных судов при условии минимизации задержек / Ю. Л. Короткова, Ю. А. Мезенцев // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2019). В 4 т. Т. 3. Математическое моделирование физико-технических процессов и систем: сб. тр. 5 междунар. конф. и молодеж. шк., Самара, 21–24 мая 2019 г. – Самара: Новая техника, 2019. – С. 448-456. - ISBN 978-5-88940-151-3.

12. Мезенцев Ю. А. О задаче оптимального оперативного управления графиком движением воздушных судов по критерию минимизации задержек вылетов / Ю. А. Мезенцев, Ю. Л. Короткова // Интеллектуальный анализ сигналов, данных и знаний: методы и средства: сб. ст. 2 Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием им. В. В. Губарева, 11-13 дек. 2018 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2018. - С. 385-395. - 50 экз. - ISBN 978-5-7782-3729-2.

13. Мезенцев Ю. А. Оптимизация расписаний несвязанных параллельных приборов с задержками начала обслуживания, алгоритмы и практическое приложение / Ю. А. Мезенцев, Ю. Л. Короткова // Прикладные задачи математики: материалы 26 междунар. науч.-техн. конф. (Севастополь, 17-21 сент. 2018 г.). - Севастополь, 2018. - С. 203-208. - ISBN 978-5-6041740-0-5.

14. Короткова Ю. Л. Постановка задачи оптимального оперативного управления графиком движения воздушных судов при условии минимизации задержек/ Короткова Ю. Л., Мезенцев Ю. А. // Динамические системы: устойчивость, управление, оптимизация. Материалы Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Е.А. Барбашина. – Минск, 2018. – С. 163-165.

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр-т. К. Маркса, 20.
Тел./факс: (383)346-08-57
Формат 60x84 1/16, объем 1,25 п.л., тираж 100 экз.