

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND MANAGEMENT

УДК 519.854.3-6

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-4-19-36

Риск-ориентированный подход к решению задачи оперативного управления расписанием авиакомпаний*

Ю.Л. КОРОТКОВА^а, Ю.А. МЕЗЕНЦЕВ^б

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

^а JuliaPetrunina@yandex.ru ^б mesyan@yandex.ru

В статье рассматривается задача оптимального регулирования назначений воздушных судов по рейсам авиакомпании. В силу того, что деятельность любой авиакомпании подвержена изменениям, вызываемым как внешней, так и внутренней средой, плановое расписание нуждается в постоянном управлении и контроле. В случае, когда происходит отклонение фактического графика полетов от запланированного, необходимо оперативное принятие решения о корректировке (восстановлении) расписания и переназначении воздушных судов. Оперативное управление расписанием предполагает внесение корректировок на глубину от нескольких часов до нескольких суток. Решение задачи заключается в определении однозначного соответствия рейсов и конкретных воздушных судов при условии максимизации целевых показателей производственной деятельности и соблюдении ряда ограничений. Задача управления расписанием авиакомпании относится к классу задач оптимизации параллельно-последовательных систем, изучаемых в рамках теории расписания, является NP-трудной и требует разработки вычислительно эффективных алгоритмов решения. Однако отдельного внимания заслуживает вопрос выбора критериев для задачи оптимизации, поскольку правильный выбор играет существенную роль с точки зрения оценки эффективности принятия решений. В теории принятия решений не найдено общего метода выбора критериев оптимальности. Определение целевого критерия зависит от ожиданий производства. В рамках настоящей статьи предложен оригинальный критерий для построения оптимального решения дискретной задачи управления назначениями воздушных судов, основная идея которого заключается в нахождении баланса между длительностью расписания и количеством рейсов с негативным отклонением от запланированного графика через оценку уровня риска нарушения пунктуальности. В работе дается развернутое понятие пунктуальности, представлено описание подхода к оценке уровня риска, а также предложена оригинальная формальная постановка задачи оперативного управления

* Статья получена 10 апреля 2021 г.

Исследование выполнено в НГТУ при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-90012\19, а также Министерства науки и высшего образования в рамках госзадания (проект FSUN-2020-0009).

назначениями воздушных судов по векторному критерию минимизации отклонений от действующего расписания и нарушений общей пунктуальности рейсов авиакомпании.

Ключевые слова: трудно решаемые задачи, критерий оптимизации, уровень риска, пунктуальность, оптимизация расписаний, назначения воздушных судов, эвристический алгоритм, декомпозиция, задержки рейсов, поэтапное формирование расписаний, расчет пунктуальности

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы эффективного управления сложными технологическими и экономическими системами и процессами порождают трудно решаемые задачи дискретной оптимизации. Одной из традиционных областей применения методов оптимизации является авиация. И поскольку расписание – это основа производственного процесса любой авиакомпании, задачи, связанные с планированием и управлением расписаниями, являются наиболее актуальными и при этом наиболее сложными ввиду высокой размерности и необходимости учета целого ряда ограничений.

В силу того, что деятельность авиакомпании подвержена изменениям, вызываемым как внешней, так и внутренней средой, плановое расписание нуждается в постоянном контроле и регулировании. Оперативное управление расписанием авиакомпании предполагает внесение корректировок в текущее расписание от нескольких часов до нескольких суток исходя из совокупности ожидаемых или реализовавшихся событий и заключается в принятии решения о том, какой борт должен быть назначен на каждый рейс [1]. Задачи данного класса относятся к NP-трудным, а учитывая потребность авиакомпаний в получении моментального решения, требуют применения специальных быстрых алгоритмов.

В работе [6] рассмотрены подходы к оптимизации назначений воздушных судов (далее – ВС) по рейсам авиакомпании, предложены оригинальные постановки задачи оптимизации расписания по критерию минимизации задержек. Однако отдельного внимания требует вопрос выбора критерия оптимизации, поскольку правильный выбор играет существенную роль с точки зрения оценки эффективности принятия решений. В теории принятия решений не найдено общего метода выбора критериев оптимальности. Определение целевого критерия зависит от ожиданий бизнеса. В рамках настоящей статьи предложен оригинальный подход к построению оптимального решения дискретной задачи управления назначениями воздушных судов, основная идея которого заключается в нахождении баланса между суммарными отклонениями от действующего расписания и количеством рейсов с негативным отклонением от запланированного графика через оценку уровня нарушений пунктуальности. В работе дается развернутое понятие пунктуальности, представлено описание подхода к оценке уровня нарушений, а также предложена оригинальная формальная постановка задачи оперативного управления назначениями воздушных судов по векторному критерию минимизации нарушений пунктуальности рейсов.

1. ПОНЯТИЕ ПУНКТУАЛЬНОСТИ

Пунктуальность (регулярность) – один из важнейших показателей эффективности транспортной системы, мера способности системы выполнить работу вовремя. Наилучшим образом транспортная система функционирует именно тогда, когда службы работают точно по графику, так как лицо, планирующее использование службы, может согласовать свою деятельность с деятельностью транспортной системы.

В СССР правила учета пунктуальности были определены Руководством по обеспечению и учету регулярности полетов воздушных судов гражданской авиации СССР (РПП ГА-90) и утверждены Приказом МГА СССР от 10.01.1990 № 6 «Об утверждении и введении в действие Руководства по обеспечению и учету регулярности полетов воздушных судов гражданской авиации». Этот документ утратил силу на территории Российской Федерации в связи с изданием Приказа Минтранса России от 04.12.2020 № 541. В настоящий момент выполняется разработка новой методики учета задержек и пунктуальности авиарейсов. Несмотря на отсутствие унифицированного подхода, абсолютно все авиакомпании и аэропорты, являясь частью транспортной системы, внимательно следят за своевременным выполнением рейсов, разрабатывают и руководствуются собственными положениями.

В широком смысле пунктуальность – это выраженное в процентах отношение количества рейсов, выполненных с допустимой задержкой, к общему количеству выполненных рейсов [2]. Пунктуальность может быть рассчитана как по отправлению, так и по прибытию. На примере отправлений в общем виде расчет можно представить следующим образом:

$$R_{dep} = \frac{I_d}{I} 100 \% . \quad (1)$$

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

Существует несколько глобальных поставщиков данных по пунктуальности, которые публикуют в сети Интернет рейтинги для авиакомпаний и аэропортов. Далее представлены наиболее популярные из них.

OAG – глобальный поставщик данных о перевозках со штаб-квартирой в Великобритании. Рейтинги OAG – наиболее достоверные и повсеместно используются авиакомпаниями для оценки своих позиций относительно конкурентов. В рейтинги OAG попадают все компании, предоставляющие данные не менее чем по 80 % рейсов. Согласно критериям OAG, рейс считается нерегулярным, если имело место опоздание более 15 минут от запланированного времени вылета или прилета. Отмененный рейс также считается нерегулярным.

Еще один крупнейший поставщик авиационных данных, наряду с OAG, – FlightStats. Регулярным рейсом по методике FlightStats считается рейс, прибывший к месту стоянки в интервале ± 15 минут от плана.

Чем же обусловлена важность показателя пунктуальности для авиакомпаний?

Во-первых, пунктуальность напрямую влияет на лояльность клиентов авиакомпании. На рис. 1 представлены статистические данные, показывающие зависимость между пунктуальностью прибытий и NPS одной из действующих авиакомпаний РФ; NPS (Net Promoter Score) – это индекс лояльности клиентов, один из ключевых показателей для оценки имиджа [3]. Очевидно, что лояльность пассажиров зависит не только от пунктуальности, однако, несмотря на это, коэффициент корреляции достигает значения 0,74.

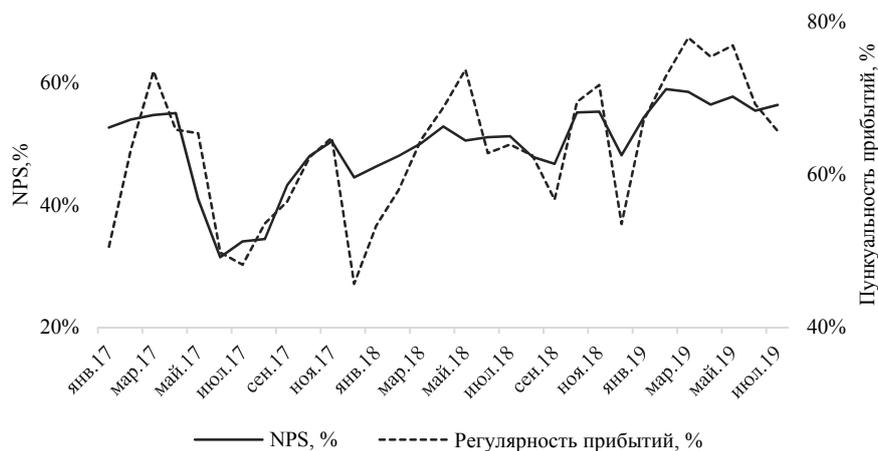


Рис. 1. Зависимость NPS и регулярности прибытий

Fig. 1. Dependence of NPS and regularity of arrivals

Во-вторых, несоблюдение планового времени вылета и прибытия рейсов приводит к дополнительным расходам для авиакомпаний, связанным с обслуживанием пассажиров и рейсов, а также всевозможными штрафными санкциями со стороны обслуживающих компаний.

В-третьих, авиакомпании, выполняющие рейсы с хорошей регулярностью, могут получить дополнительные скидки на наземное обслуживание от аэропортов. Подобные программы введены в таких аэропортах, как Омск, Казань, Домодедово и другие.

2. ПОНЯТИЕ И МЕРА РИСКА НАРУШЕНИЙ ПУНКТУАЛЬНОСТИ

Организации всех типов и размеров сталкиваются с внутренними и внешними факторами и воздействиями, которые порождают неопределенность в отношении того, достигнут ли они своих целей, и когда достигнут. Согласно ГОСТ Р ИСО 31000–2010 (Менеджмент риска. Принципы и руководство), влияние такой неопределенности на цели организации и есть риск [4]. В соответствии со Стандартом, процесс оценки рисков содержит три этапа: **идентификация** риска (процесс обнаружения, распознавания и описания рисков, включает выявление источников риска, событий, последствий), **анализ** (определение степени риска, в том числе количественная оценка уровня риска), **оценка** (процесс сравнения результатов анализа с установленными критериями риска для определения, является ли риск приемлемым или

допустимым, критерии определяются организацией и являются индикаторами относительно необходимости воздействия на риск).

Одним из методов оценки рисков является применение «Матрицы последствий и частот возникновения отклонений» [5]. Матрица последствий и частот (далее – матрица рисков) является средством объединения оценок последствий (тяжести событий) и частот возникновения отклонений, применяется для определения и ранжирования уровня риска, дальнейшей оценки того, требуется воздействие на риск или нет. Входными данными для построения матрицы рисков являются шкалы последствий и частот возникновения негативных отклонений, установленные в соответствии с требованиями предприятия, а также матрица, которая их объединяет. Шкала может иметь любое количество точек. Наиболее распространены шкалы, имеющие 3, 4 или 5 точек. Шкала частот также может иметь любое количество точек. Здесь важно отметить, что в терминологии менеджмента риска термин «частота» (или «возможность») означает шанс того, что что-то может произойти, независимо от того, установлено ли это, измерено, определено объективно или субъективно, качественно или количественно и описывается ли с помощью общих понятий или математически. В английском языке в терминологии менеджмента риска используется термин *likelihood*, чтобы придать ему широкий смысл, нежели *probability*, который часто понимают в узком математическом смысле. С целью однозначного трактования материала введем понятие *ранг* для обозначения степени тяжести и частоты отклонений на шкале матрицы рисков.

В табл. 1 представлен пример матрицы рисков R для любого рейса i . По вертикали показана возрастающая серьезность последствий, по горизонтали – ранг частоты возникновения негативных событий. Элементы матрицы отражают уровни риска и вычисляются следующим образом:

$$R_{k,l} = P_l F_k, \quad k = \overline{1, K}, l = \overline{1, L}. \quad (2)$$

Здесь F_k – степень тяжести по негативным отклонениям факта от плана (в абсолютных или в относительных величинах); P_l – оценка частоты возникновения негативных отклонений.

Таблица 1

Table 1

Матрица рисков

Risk Matrix

Ранг частоты возникновения негативных отклонений P_l	1	2	3	4	5
Ранг тяжести негативных отклонений F_k					
1	1	2	3	4	5
2	2	4	6	8	10
3	3	6	9	12	15
4	4	8	12	16	20
5	5	10	15	20	25

Ранжирование уровня риска может быть произведено по шкале, разделенной на три интервала, которые позволяют определить степень приемлемости и необходимость воздействия на риск (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

Уровни риска и необходимость воздействия
Risk levels and the need for impact

Количественная оценка уровня риска	Качественная оценка уровня риска	Необходимость воздействия
(0;5]	Незначительный	Отсутствует
(5;9]	Приемлемый	На усмотрение ответственного лица, принимающего решение
(9;25)	Недопустимый	Обязательна

3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА УРОВНЯ РИСКА НАРУШЕНИЯ ПУНКТУАЛЬНОСТИ

Как отмечено выше, пунктуальность – степень своевременности выполнения операций (рейсов). Цель каждой авиакомпании – максимизировать пунктуальность, предельное значение которой 100 %. На пути достижения цели важно отслеживать уровень риска – показатель, позволяющий выявить нестабильность, возникающую в процессе достижения цели, на основе событий об отклонения от плана.

Рассмотрим расчет уровня риска по показателю «Пунктуальность отправлений», основанный на применении матрицы риска и идеях, заложенных в работе [6]. Описанный подход применяется на одном из предприятий авиатранспортной отрасли РФ.

Определим шкалу тяжести в качестве входных данных для построения матрицы риска по критерию «Пунктуальность отправлений». Для рассматриваемого критерия тяжесть может быть выражена через задержку, т. е. отклонение фактического времени вылета от планового в минутах. Как отмечено ранее, шкалы устанавливаются в соответствии с требованиями и целями предприятия. В табл. 3 представлена шкала, которую используют на одном из действующих предприятий авиатранспортной отрасли.

Таблица 3

Table 3

Соотношение задержек и ранга тяжести отклонений
Correlation of delays and the severity rank of violations

Ранг тяжести негативных отклонений рейса i ($F_{i,k}$)	Время задержки τ_i^0 , мин
1	[1; 5]
2	(5;10]
3	(10; 15]
4	(15; 20]
5	Более 20 мин

Опираясь на подход, предложенный в работе [5], ранг тяжести задержки рейса F_i [0÷5] можно рассчитать по формуле

$$F_i = \min \left[5; a \cdot \ln \left(1 + b\tau_i^0 \right) \right]. \quad (3)$$

Здесь и далее τ_i^0 – величина задержки начала выполнения i -го рейса; $\tau_{i,j}^0$ – величина задержки начала выполнения i -го рейса воздушным судном 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 (рис. 2). Для рассматриваемого примера $a = 4,9$ и $b = 0,087$. Применение логарифмической функции позволяет получить наиболее точную эмпирическую оценку ранга в формате непорядкового числительного.

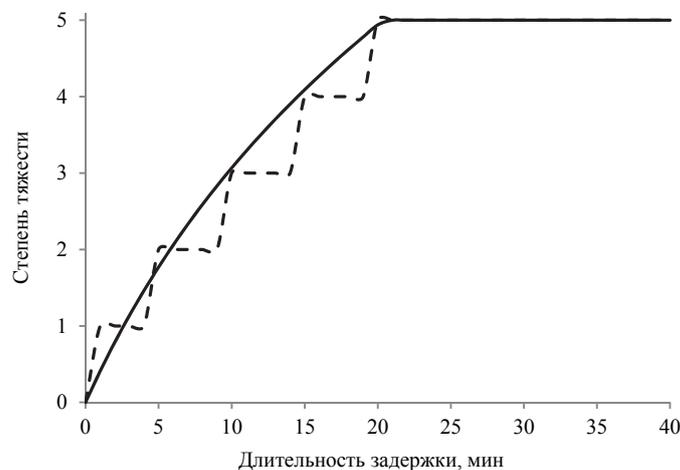


Рис. 2. График зависимости ранга тяжести от времени задержки

Fig. 2. Graph of the dependence of the severity rank on the time of delays

Определим также шкалу частот в качестве входных данных для построения матрицы риска (ранг частоты возникновения негативных отклонений). Для рассматриваемого критерия «Регулярность отправлений» ранг частоты возникновения негативных отклонений может быть выражен через долю рейсов, имеющих задержку отправлений $\tau_i^0 > T$, где T – время допустимой задержки (табл. 4).

Формула расчета ранга частоты задержек может быть записана следующим образом:

$$P = \min \left[5; a \cdot \ln \left(1 + b(1 - R_{dep}) \right) \right]. \quad (4)$$

Здесь a и b – коэффициенты логарифмической функции, определяющиеся методом наименьших квадратов (рис. 3); $(1 - R_{dep})$ – доля рейсов с задержкой отправления. Для рассматриваемого примера (табл. 4) $a = 6,8$ и $b = 3$.

Таблица 4

Table 4

Соотношение доли рейсов с задержкой и ранга частоты возникновения негативных событий

The ratio of the proportion of flights with a delay and the rank of the frequency of occurrence of negative events

Ранг частоты возникновения негативных отклонений P_i	Доля рейсов с задержкой отправления $(1 - R_{dep})$
1	(0; 0,09]
2	(0,09; 0,18]
3	(0,18; 0,27]
4	(0,27; 0,36]
5	(0,36; 1]

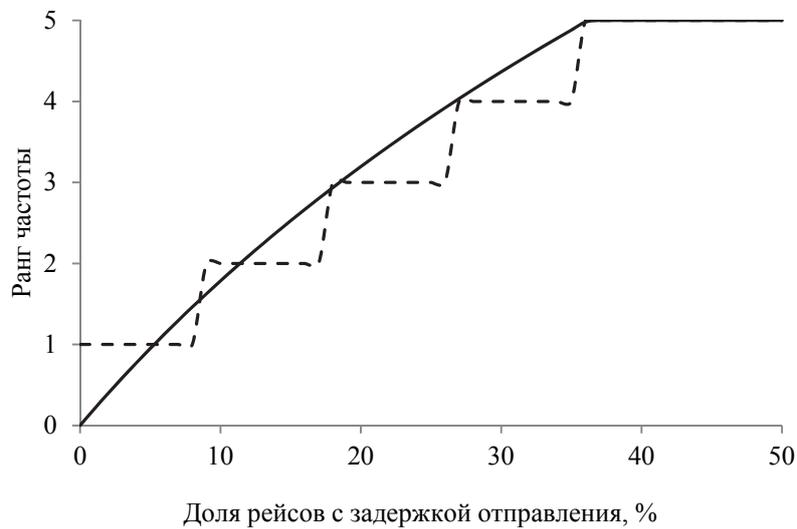


Рис. 3. График зависимости ранга частоты задержек и доли рейсов с задержкой

Fig. 3. Graph of dependence of the delay frequency rank and the proportion of flights with a delay

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

$$R = \frac{\sum_{i=1}^I F_i}{I_d} P \rightarrow \min. \quad (5)$$

Здесь I – общее количество рейсов; I_d – количество рейсов, имеющих задержку отправления $\tau_i^0 > T$ (T – время допустимой задержки).

4. ФОРМАЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время показатель регулярности отправок и риск по регулярности оценивается по факту исполнения графика полетов. При решении задач оперативного регулирования текущих графиков вылета воздушных судов авиакомпании используют классические подходы к управлению: минимизация количества отмененных рейсов, минимизация количества задержек или суммарного времени задержек, минимизация стоимости перевозки и т. д. (табл. 5).

Таблица 5

Table 5

Ретроспектива применения различных критериев эффективности для решения задач управления расписанием

A retrospective of the application of different effective criteria for solving schedule management problems

Год	Автор	Целевая функция	
1984	Teodorovic and Guberinic	min	Задержки
1990–1995	Teodorović & Stojkovic	min	Количество отмененных рейсов и задержек
1993	Jarrah (для United Airlines)	min	Расходы на задержки, отмены и замены
1997	Cao and Kanafani	max	Выручка за вычетом расходов на задержки, отмены и замены
1996	Yan & Yang	max	Выручка за вычетом расходов
1997	Yan & Tu	max	Общая выручка
1996	Talluri	min	Расходы, связанные с заменой воздушных судов
1997	Argüello	min	Расходы, связанные с переназначениями и отменами рейсов
1997	Lou and Yu	max	Регулярность
2000–2001	Thengvall et al.	max	Выручка за вычетом расходов
2000	Bard	min	Задержки и расходы, связанные с отменами
2003	Rosenberger	min	Расходы, связанные с переназначениями, задержками и отменами рейсов
2004	Anderson and Varbrand	max	Выручка за вычетом расходов
2006	Lan, Clarke и Barnhart	min	Задержки
2009	Eggenberg	min	Расходы (операционный, на сбойные ситуации)
2012	Bisaillon et al.	min	Нарушение стыковок
2011	Hu	min	Задержки и расходы, связанные с отменами рейсов и обслуживанием пассажиров в сбойных ситуациях

Информацию по ретроспективе исследований в данном направлении также можно получить в работах [7–17].

Рассмотрим возможность применения в качестве критерия эффективности для регулирования расписания проактивный критерий минимизации риска нарушения регулярности отправлений.

Понятие риска включает в себя не только оценку величины отклонения фактического графика полетов от планового, но и частоту нарушений. Таким образом, применяя в качестве критерия оптимизации уровень риска, можем минимизировать не только задержки, но и систематические нарушения расписания, когда задержка может быть небольшой, но возникать постоянно.

Существует несколько формальных постановок и подходов к решению задачи оперативного управления назначениями воздушных судов, в том числе предложенная авторами формализация задачи с дизъюнкциями в ограничениях и априорным назначением последовательности выполнения рейсов [8]. Выполним модификацию данной постановки с учетом условия минимизации риска нарушения регулярности отправлений в качестве критерия оптимизации.

Через $t_{i,j}$ обозначим заданное время обслуживания рейса i ВС j ; $T = \|t_{i,j}\|$, $j = \overline{1, J}$, $i = \overline{1, I}$. Кроме этого, пусть \underline{b}_j и \overline{b}_j соответственно минимальное и максимальное число рейсов, назначаемых ВС j . Здесь и далее $\|\cdot\|$ обозначает вектор, матрицу или тензор, соответствующие контексту размерности.

Через S_i обозначим исходное расписание вылета рейса $i = \overline{1, I}$, пересчитанное в виде лага в минутах от начала суток (00:00 часов).

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 $T^0 = \|\tau_{i,j}^0\|$, $j = \overline{1, J}$, $i = \overline{1, I}$ (I – общее число рейсов, J – число ВС), можно интерпретировать как расписание на входе каждого из 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 , $i \in I_v$, и текущих задержек рейсов на всех шагах приведенного ниже алгоритма A_v .

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

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,

$C_i = \sum_{j=1}^J C_{i,j}$). Тогда формулируемую задачу можно представить следующим образом.

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

$$\sum_{j=1}^J x_{i,j} = 1, \quad i = \overline{1, I}, \quad (6)$$

$$\underline{b}_j \leq \sum_{i=1}^I x_{i,j} \leq \overline{b}_j, \quad j = \overline{1, J}, \quad (7)$$

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если рейс } i \text{ назначен ВС } j, \\ 0 & \text{в противном случае, } i = \overline{1, I}, \quad j = \overline{1, J}, \end{cases} \quad (8)$$

$$C_{i,j} \geq S_i, \quad i = \overline{1, I}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (9)$$

$$C_{i,j} \geq \tau_{i,j}^0 x_{i,j}, \quad i = \overline{1, I}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (10)$$

$$C_{i,j} + t_{i,j} x_{i,j} \leq C_{k,j}, \quad i = \overline{1, I}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^J \tau_{i,j}^0 x_{i,j} \leq C_i, \quad i = \overline{1, I}, \quad (12)$$

$$\Delta = \sum_{i=1}^I \left(C_i - S_i \sum_{j=1}^J x_{i,j} \right) \rightarrow \min. \quad (13)$$

Далее приведены результаты вычислительного эксперимента регулирования расписания в соответствии с постановкой (5)–(13) с использованием различных подходов к разбиению множества рейсов (табл. 6). Общее количество рейсов в расписании – 90.

Таблица 6

Table 6

Перечень эвристических алгоритмов разбиения множества рейсов
Heuristic algorithms for splitting flights array

Алгоритм	Подход к разбиению	Шаг	1	2	3	4	5
A1	Порядок выборок соответствует исходному расписанию. На первых четырех шагах выбираются первые 30 рейсов из списка оставшихся	Количество рейсов	30	30	30	30	10
		Количество бортов	20	20	20	20	10
A2	На каждом шаге в перераспределении участвуют все оставшиеся рейсы	Количество рейсов	90	70	50	30	10
		Количество бортов	20	20	20	20	10
A3	Порядок соответствует исходному расписанию	Количество рейсов	90	50	10	–	–
		Количество бортов	40	40	10	–	–
A4	Упорядочение выборки рейсов по времени вылета	Количество рейсов	30	30	30	30	10
		Количество бортов	20	20	20	20	10

В табл. 7–10 приведены расчеты, выполненные на срезе (7 рейсов) суточного расписания одной из действующих авиакомпаний. Серым цветом выделено скорректированное время вылета по рейсам. Каждая таблица содержит плановое S_i и расчетное C_i расписание, отклонение расчетного графика от планового $\Delta_{v,i}$ и соответствующие значения степени тяжести отклонения F_i , а также исходное время вылета каждого рейса и расчетное (выделено жирным шрифтом).

Таблица 7

Table 7

Назначения $x_{i,j}^*$, полученные по алгоритму 1

Assignments $x_{i,j}^*$, calculated by algorithm 1

Номер рейса	64	69	29	98	44	24	23
Направление	KZN – DME	DME – KZN	DME – KUF	UFA – DME	LED – DME	LED – DME	DME – LED
S_i	1155	1255	1255	1050	1025	1130	985
C_i	1155	1255	1255	1059	1072	1330	985
$\Delta_{v,i}$	0	0	0	9	47	200	0
F_i	0	0	0	2,83	5	5	0
Распределение ВС по рейсам							
VP-BHF							
VP-BTN	19:15						
VP-BTS			20:55				
VP-BTU					17:52		
VQ-BRC		20:55		17:30			
VQ-BYL							
VP-BTP					17:05		
VQ-BYD							
VP-BHQ						18:50	16:25
VP-BHK						22:10	

Для подмножества рейсов, представленных в табл. 7, ранг частоты задержек составил 5. Уровень риска R_{A1} по критерию «Регулярность отправлений» составил 4,5.

Таблица 8

Table 8

Назначения $x_{i,j}^*$, полученные по алгоритму 2Assignments $x_{i,j}^*$, calculated by algorithm 2

Номер рейса	64	69	29	98	44	24	23
Направление	KZN – DME	DME – KZN	DME – KUF	UFA – DME	LED – DME	LED – DME	DME – LED
S_i	1155	1255	1255	1050	1025	1130	985
C_i	1155	1312	1255	1059	1032	1190	985
$\Delta_{v,i}$	0	57	0	9	7	60	0
F_i	0	5	0	2,83366	2,3305	5	0
Распределение ВС по рейсам							
VP-BHF							
VP-BTN	19:15						
VP-BTS			20:55				
VP-BTU							
VQ-BRC		20:55		17:30			
VQ-BYL							
VP-BTP		21:52			17:05		
VQ-BYD							
VP-BHQ						18:50	16:25
VP-BHK							
VP-BDG (резерв)						19:50	

В табл. 8 представлен фрагмент расписания, сформированного при использовании разбиения рейсов по алгоритму А2. Нетрудно заметить, что назначения ВС на рейсы при различных подходах к разбиению отличаются. В данном примере борт VP-BDG – это резервное воздушное судно, которое на момент формирования расписания находилось в базовом аэропорту.

В табл. 9 приведено расписание, синтезированное при разбиении рейсов по критериям (5) и (13) согласно алгоритму А3.

Таблица 9

Table 9

Назначения $x_{i,j}^*$, полученные по алгоритму 3Assignments $x_{i,j}^*$, calculated by algorithm 3

Номер рейса	64	69	29	98	44	24	23
Направление	KZN – DME	DME – KZN	DME – KUF	UFA – DME	LED – DME	LED – DME	DME – LED
S_i	1155	1255	1255	1050	1025	1130	985
C_i	1155	1312	1255	1059	1032	1330	985
$\Delta_{v,i}$	0	57	0	9	7	200	0

Окончание табл. 9

End of Tab. 9

Номер рейса	64	69	29	98	44	24	23
Направление	KZN – DME	DME – KZN	DME – KUF	UFA – DME	LED – DME	LED – DME	DME – LED
F_i	0	5	0	2,8336 6	2,3305	5	0
Распределение ВС по рейсам							
VP-BHF							
VP-BTN	19:15						
VP-BTS			20:55				
VP-BTU							
VQ-BRC		20:55		17:30			
VQ-BYL							
VP-BTP		21:52			17:05		
VQ-BYD							
VP-BHQ						18:50	16:25
VP-BHK						22:10	
VP-BDG (резерв)							

В табл. 10 приведено расписание, синтезированное при разбиения рейсов по алгоритму разбиения A4.

Таблица 10

Table 10

Назначения $x_{i,j}^*$, полученные по алгоритму 4

Assignments $x_{i,j}^*$, calculated by algorithm 4

Номер рейса	64	69	29	98	44	24	23
Направление	KZN – DME	DME – KZN	DME – KUF	UFA – DME	LED – DME	LED – DME	DME – LED
		1155	1255	1255	1050	1025	1130
S_i	1155	1255	1255	1059	1127	1190	985
C_i	0	0	0	9	102	60	0
$\Delta_{v,i}$	0	0	0	2,83366	5	5	0
Распределение ВС по рейсам							
VP-BHF							
VP-BTN	19:15						
VP-BTS			20:55				
VP-BTU							
VQ-BRC		20:55		17:30			
VQ-BYL							
VP-BTP					17:05		
VQ-BYD							
VP-BHQ						18:50	16:25
VP-BHK							
VP-BDG (резерв)						19:50	

В табл. 11 представлено сравнение эффективности работы алгоритма корректировки расписания и решений, принимаемых сотрудниками ЦУП авиакомпании (представленные данные являются реальными, предоставлены действующей авиакомпанией). Здесь R_i – это уровень риска, рассчитанный для четырех различных вариантов синтеза расписания, отличающихся различным подходом к разбиению множества рейсов.

Таблица 11

Table 11

Сравнение параметров расчетного оптимального расписания и фактического
Comparison of the parameters of the calculated and actual optimal schedules

Параметры	Факт	R_{A1}	R_{A2}	R_{A3}	R_{A4}
Доля рейсов с задержкой	50,0 %	26,7 %	26,7 %	27,8	24,4 %
Суммарное время задержек	2405	975	1083	938	1003
Уровень риска	9,5	4,5	4,4	4,9	3,5
Всего рейсов	90	90	90	90	90

Отметим очевидное преимущество применения алгоритма оптимизации расписания. Наиболее эффективное решение по критерию минимизации уровня риска нарушения пунктуальности получено при разбиении рейсов по алгоритму A4, который предполагает упорядочивание рейсов по плановому времени вылета. Без использования автоматизированных средств действия сотрудников ЦУП приводят к дополнительным расходам авиакомпании, связанным с задержками рейсов. Для данной выборки рейсов время задержки рейсов могло быть сокращено на 58 % относительно фактически реализовавшегося расписания за счет применения оптимизационных решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложен оригинальный критерий оценки эффективности задачи оперативного управления назначениями воздушных судов по рейсам авиакомпании, основная идея которого заключается в минимизации уровня риска нарушения пунктуальности рейсов. Данный подход позволяет, с одной стороны, минимизировать длительность расписания (задержки), с другой – минимизировать количество рейсов с негативным отклонением от запланированного графика. Разработанный критерий может быть полезен для авиакомпаний, у которых внедрены системы риск-менеджмента и управления качеством.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, исследовательский проект № 19-37-90012/19, и при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках госзадания, проект FSUN-2020-0009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rushmeier R.A., Hoffman K.L., Padberg M.* Recent advances in exact optimization of airline scheduling problems: technical report. – George Mason University, 1995.
2. *Наумова Д.А.* Методики оценки регулярности полетов компаний // Научный вестник МГТУ ГА. – 2012. – № 187. – С. 90–93.
3. *Симонян Т.В., Довгалева М.В.* Современный метод измерения лояльности клиентов Net Promoter Score // Научный альманах. – 2016. – № 1-1 (15). – С. 267–272. – DOI: 10.17117/na.2016.01.01.267.
4. ГОСТ Р ИСО 31000–2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство. – Взамен ГОСТ Р ИСО 31000–2010; введ. 01.03.2020. – М.: Стандартинформ, 2020.
5. ГОСТ Р 58771–2019. Менеджмент риска. Технологии оценки риска. – Взамен ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010–2011; введ. 01.03.2020. – М.: Стандартинформ, 2020.
6. *Коротченко Е.А., Петрунина Ю.Л.* Метод оценки рисков «Критерии. События. Правила» // International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Vol. 4, N 5. – P. 52–58.
7. A decision support framework for airline flight cancellations and delays / A.I.Z. Jarrah, G.Yu, N. Krishnamurthy, A. Rakshit // Transportation Science. – 1993. – Vol. 27, N 3. – P. 266–280. – DOI: 10.1287/trsc.27.3.266.
8. *Cao J.M., Kanafi A.* Real-time decision support for integration of airline flight cancellations and delays. Pt. I: Mathematical formulation // Transportation Planning and Technology. – 1997. – Vol. 20, N 3. – P. 183–199. – DOI: 10.1080/03081069708717588.
9. *Talluri K.T.* Swapping applications in a daily airline fleet assignment // Transportation Science. – 1996. – Vol. 30, N 3. – P. 237–248.
10. *Yan S., Yang D.-H.* A decision support framework for handling schedule perturbation // Transportation Research. Part B: Methodological. – 1996. – Vol. 30, N 6. – P. 405–419.
11. *Yan S., Tu Y.P.* Multifleet routing and multistop flight scheduling for schedule perturbation // European Journal of Operational Research. – 1996. – Vol. 103. – P. 155–169. – DOI: 10.1016/S0377-2217(96)00260-3.
12. *Lou S., Yu G.* On the airline schedule perturbation problem caused by the ground delay program // Transportation Science. – 1997. – Vol. 31, N 4. – P. 298–311. – DOI: 10.1287/trsc.31.4.298.
13. *Arguello M.F., Bard J.F., Yu G.* A GRASP for aircraft routing in response to grounding and delays // Journal of Combinatorial Optimization. – 1997. – Vol. 5. – P. 211–228.
14. *Bard J.F., Yu G., Arguello M.F.* Optimizing aircraft routings in response to groundings and delays // IE Transactions. – 2001. – Vol. 33, iss. 10. – P. 931–947. – DOI: 10.1023/A:1010987008497.
15. *Thengvall B.G., Bard J.F., Yu G.* Balancing user preferences for aircraft schedule recovery during irregular operations // IE Transactions. – 2000. – Vol. 32, iss. 3. – P. 181–193. – DOI: 10.1023/A:1007618928820.
16. *Rosenberger J.M., Johnson E.L., Nemhauser G.L.* Rerouting aircraft for airline recovery // Transportation Science. – 2003. – Vol. 37, N 4. – P. 408–421.
17. *Andersson T., Varbrand P.* The flight perturbation problem // Transportation Planning and Technology. – 2004. – Vol. 27, N 2. – P. 91–118. – DOI: 10.1080/0308106042000218195.
18. *Мезенцев Ю.А., Короткова Ю.Л., Эстрайх И.В.* Задача и инструменты оптимального регулирования расписаний флота авиакомпании // Информационные технологии. – 2020. – Т. 26, № 8. – С. 450–459. – DOI: 10.17587/it.26.450-459.

Короткова Юлия Леонидовна, младший научный сотрудник кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – информационные технологии и математические методы оптимизации параллельно-последовательных систем. Имеет 7 публикаций. E-mail: juliapetrunina@yandex.ru

Мезенцев Юрий Анатольевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – методы дискретной оптимизации, системный анализ и математическое моделирование экономических процессов на уровне предприятий. Имеет более 70 публикаций. E-mail: meyan@yandex.ru

Korotkova Yulia L., a post-graduate student, a junior researcher at the automated control system department, NSTU. Her research interests are currently focused on information technologies and mathematical methods of optimization on parallel-serial system. She has 7 publications. E-mail: juliapetrulina@yandex.ru

Mesentsev Yury A., D.Sc. (Eng.), professor at the automated control system department, NSTU. His research interests are currently focused on methods of discrete optimization, system analysis and math modeling of economics processes at the enterprise level. He has more than 70 publications. E-mail: meyan@yandex.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-4-19-36

A risk-based approach to solving the problem of airline schedule operational management*

Yu.L. KOROTKOVA¹, Yu.A. MESENTSEV²

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

^a juliapetrulina@yandex.ru ^b mesyan@yandex.ru

Abstract

The paper discusses the problem of optimal regulation of aircraft assignments for airline flights. Due to the fact that the activities of the airline are subject to changes caused by both external and internal environment, the planned schedule needs continuous management and control. In the event when the actual flight schedule deviates from the planned one, it is necessary to promptly make a decision on adjusting (restoring) the schedule and reassigning aircraft. Operational schedule management involves making adjustments to the current schedule from a depth of several hours to several days. The solution to the problem is to determine the unambiguous correspondence of flights and specific aircraft subject to maximizing the likelihood of meeting production targets and observing a number of restrictions. The task of managing airline schedules belongs to the class of scheduling optimization problems for parallel-sequential systems studied within the scheduling theory. It is NP-hard and requires the development of computationally efficient solution algorithms. However, the issue of choosing criteria for the optimization problem deserves special attention, since the correct choice plays an essential role in terms of assessing the effectiveness of decision-making. In the theory of decision-making, no general method for choosing the optimality criteria has been found. The definition of the target criterion depends on the expectations of the production. Within the framework of this paper, an original criterion is proposed for constructing an optimal solution to the discrete problem of managing aircraft assignments, the main idea of which is to find a balance between the duration of the schedule and the number of flights with a negative deviation from the planned schedule by assessing the level of punctuality violation risk. The paper gives a detailed concept of punctuality, describes an approach to assessing the level of risk, and also proposes an original formal formulation of the task of operational management of aircraft assignments based on the criterion of minimizing the risk of violation of flight punctuality.

Keywords: NP-problems, optimization criterion, risk level, punctuality, schedule optimization, aircraft assignments, heuristic algorithm, decomposition, flight delays, step-by-step schedule formation, on-time performance calculation

* Received 10 April 2021.

The work is supported by the Russian Foundation for Basic Research, Re-search Project No. 19-37-90012/19; and financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the State Task, Project FSUN-2020-0009.

REFERENCES

1. Rushmeier R.A., Hoffman K.L., Padberg M. *Recent advances in exact optimization of airline scheduling problems*. Technical Report. George Mason University, 1995.
2. Naumova D.A. Metodiki otsenki regul'yarnosti poletov kompanii [Evaluation of the regularity of flights of airlines]. *Nauchnyi Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoi aviatsii = Civil Aviation High Technologies*, 2012, no. 187, pp. 90–93.
3. Simonyan T.V., Dovgaleva M.V. Sovremennyyi metod izmereniya loy'al'nosti klientov Net Promoter Score [The modern method of measuring customer loyalty]. *Nauchnyi al'manakh = Science almanac*, 2016, no. 1-1 (15), pp. 267–272. DOI: 10.17117/na.2016.01.01.267.
4. GOST R ISO 31000–2019. *Menedzhment riska. Printsipy i rukovodstvo* [State standard 31000:2019. Risk management – Principles and guidelines]. Moscow, Standartinform Publ., 2020.
5. GOST R 58771–2019. *Menedzhment riska. Tekhnologii otsenki riska* [State standard 58771:2019. Risk management – Risk assessment techniques]. Moscow, Standartinform Publ., 2020.
6. Korotchenko E.A., Petrunina Yu.L. The method of risk assessment "Criteria. Events. Rules". *International Journal of Open Information Technologies*, 2016, vol. 4, no. 5, pp. 52–58. (In Russian).
7. Jarrah A.I.Z., Yu G., Krishnamurthy N., Rakshit A. A decision support framework for airline flight cancellations and delays. *Transportation Science*, 1993, vol. 27, no. 3, pp. 266–280. DOI: 10.1287/trsc.27.3.266.
8. Cao J.M., Kanafi A. Real-time decision support for integration of airline flight cancellations and delays. Pt. I: Mathematical formulation. *Transportation Planning and Technology*, 1997, vol. 20, no. 3, pp. 183–199. DOI: 10.1080/03081069708717588.
9. Talluri K.T. Swapping applications in a daily airline fleet assignment. *Transportation Science*, 1996, vol. 30, no. 3, pp. 237–248.
10. Yan S., Yang D.-H. A decision support framework for handling schedule perturbation. *Transportation Research. Part B: Methodological*, 1996, vol. 30, no. 6, pp. 405–419.
11. Yan S., Tu Y.P. Multifleet routing and multistop flight scheduling for schedule perturbation. *European Journal of Operational Research*, 1996, vol. 103, pp. 155–169. DOI: 10.1016/S0377-2217(96)00260-3.
12. Lou S., Yu G. On the airline schedule perturbation problem caused by the ground delay program. *Transportation Science*, 1997, vol. 31, no. 4, pp. 298–311. DOI: 10.1287/trsc.31.4.298.
13. Arguello M.F., Bard J.F., Yu G. A GRASP for aircraft routing in response to grounding and delays. *Journal of Combinatorial Optimization*, 1997, vol. 5, pp. 211–228.
14. Bard J.F., Yu G., Arguello M.F. Optimizing aircraft routings in response to groundings and delays. *IIE Transactions*, 2001, vol. 33, no. 10, pp. 931–947. DOI: 10.1023/A:1010987008497.
15. Thengvall B.G., Bard J.F., Yu G. Balancing user preferences for aircraft schedule recovery during irregular operations. *IIE Transactions*. 2000, vol. 32, iss. 3, pp. 181–193. DOI: 10.1023/A:1007618928820.
16. Rosenberger J.M., Johnson E.L., Nemhauser G.L. Rerouting aircraft for airline recovery. *Transportation Science*, 2003, vol. 37, no. 4, pp. 408–421.
17. Andersson T., Varbrand P. The flight perturbation problem. *Transportation Planning and Technology*, 2004, vol. 27, no. 2, pp. 91–118. DOI: 10.1080/0308106042000218195.
18. Mezentsev Yu.A., Korotkova Yu.L., Estrach I.V. Zadacha i instrumenty optimal'nogo regulirovaniya raspisaniya flota aviakompanii [Problem and tools for optimal regulation of airline fleet schedules]. *Informatsionnye tekhnologii = Information Technologies*, 2020, vol. 26, no. 8, pp. 450–459. DOI: 10.17587/it.26.450-459.

Для цитирования:

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

For citation:

Korotkova Yu.L., Mezentsev Yu.A. Risk-orientirovannyi podkhod k resheniyu zadachi operativnogo upravleniya raspisaniem aviakompanii [A risk-based approach to solving the problem of airline schedule operational management]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2021, no. 4 (84), pp. 19–36. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-4-19-36.

ISSN 2782-2001, <http://journals.nstu.ru/vestnik>
Analysis and data processing systems
 Vol. 84, No 4, 2021, pp. 19–36